



# Analyse méthodique de la modélisation des phénomènes couplés magnétothermiques - Cassyope : un système d'aide à la conception d'installation de chauffage par induction

Thierry Breville

## ► To cite this version:

Thierry Breville. Analyse méthodique de la modélisation des phénomènes couplés magnétothermiques - Cassyope : un système d'aide à la conception d'installation de chauffage par induction. Electromagnétisme. INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, 1986. Français. NNT : . tel-01340461

**HAL Id: tel-01340461**

**<https://hal.science/tel-01340461>**

Submitted on 1 Jul 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THESE

Présentée par

**Thierry BREVILLE**

Pour obtenir le titre de DOCTEUR

**de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE  
GRENOBLE**

---

**Analyse méthodique de la modélisation des phénomènes  
couplés magnétothermiques.**

**Cassiope : un système d'aide à la conception d'installation  
de chauffage par induction**

---

Date de soutenance : 26 juin 1986

Composition du jury

D. BLOCH	Président
M. URING	
M. FOGGIA	
J. C. SABONNADIÈRE	Co-directeur de thèse
Ph. MASSE	Co-directeur de thèse

Thèse préparée au sein du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble et du GIS-Madylam



*Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, dans le cadre du Groupement d'Interet Scientifique MADYLAM, en collaboration avec la Société CELES (Lautenbach).*

*J'adresse tous mes remerciements à :*

*Monsieur le Professeur BLOCH, Président de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.*

*Monsieur URING, Directeur de la société CELES, qui m'a permis d'entrer en contact avec l'équipe de recherche et développement de cette société et d'échanger ainsi des informations très profitables.*

*Monsieur FOGGIA, Professeur à l'Ecole Centrale de Lyon pour l'intérêt qu'il a manifesté à ce travail en honorant le jury de sa présence.*

*Monsieur SABONNADIÈRE, Professeur à l'ENSIEG, qui m'a proposé ce sujet passionnant et qui m'a permis de travailler dans son équipe de recherche.*

*Monsieur MASSE, Professeur à l'ENSPG, qui a grandement participé à l'élaboration de ce travail et qui, par son expérience associée à sa grande ouverture d'esprit, a permis de mener à bien toute cette étude.*

*Je remercie tout particulièrement Monsieur GARNIER, Directeur du GIS-MADYLAM, pour la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de cette thèse, ainsi que messieurs COULOMB, MEUNIER et BAUDON pour leur gentillesse, leurs conseils avisés, leur aide et leur participation à l'élaboration générale du travail.*

*Je tiens à remercier également Messieurs ROGNON, ROYE et JAKUBOWICZ pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée dans le domaine de la commande des automatismes séquentiels.*

*Je remercie chaleureusement tous mes camarades chercheurs ingénieurs techniciens et administratifs du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble et du GIS-MADYLAM pour leur aide et les discussions fructueuses que nous avons eues.*

*De même, j'adresse mes remerciements au personnel de la Société CELES et de la Société STEIN-HEURTEY que j'ai pu rencontrer au cours de ce travail.*

*Je remercie enfin Messieurs PERROUX et DIOT qui se sont chargés de la reproduction et de la reliure de ce mémoire.*



## SOMMAIRE



## SOMMAIRE

-----

### INTRODUCTION .

### CHAPITRE I .      Analyse synthétique de la modélisation numérique des phénomènes magnéto-thermiques .

#### Introduction

- I.1 Modèles numériques .
- I.2 Méthodes numériques .
- I.3 Difficultés techniques de modélisation des  
phénomènes couplés magnéto-thermiques .

#### Conclusion

### CHAPITRE II      Des méthodes et des outils pour la modélisation numérique des phénomènes couplés .

#### Introduction

- II.1 Prédiction correction .
- II.2 Automate de couplage .
- II.3 Résolution multiprocesseur .
- II.4 Prédiction correction croisée .
- II.5 Description formelle des propriétés  
physiques .
- II.6 Architecture du logiciel .
- II.7 Macro-élément pour la description des  
conditions aux limites dans le cas  
d'échanges radiatifs multiréflexion .

#### Conclusion .





## SOMMAIRE

-----

### INTRODUCTION .

#### CHAPITRE I .      Analyse synthétique de la modélisation numérique des phénomènes magnéto-thermiques .

##### Introduction

- I.1 Modèles numériques .
- I.2 Méthodes numériques .
- I.3 Difficultés techniques de modélisation des  
phénomènes couplés magnéto-thermiques .

##### Conclusion

#### CHAPITRE II      Des méthodes et des outils pour la modélisation numérique des phénomènes couplés .

##### Introduction

- II.1 Prédiction correction .
- II.2 Automate de couplage
- II.3 Résolution multiprocesseur .
- II.4 Prédiction correction croisée .
- II.5 Description formelle des propriétés  
physiques.
- II.6 Architecture du logiciel .
- II.7 Macro-élément pour la description des  
conditions aux limites dans le cas  
d'échanges radiatifs multiréflexion .

##### Conclusion .

## CHAPITRE III . CASSIOPEE: un ensemble de logiciels d'aide à la conception d'installations de chauffage par induction .

### Introduction

- III.1 CHLOE : Modélisation numérique d'installations de chauffage par induction au défilé .
- III.2 CELES magnétothermique : un logiciel éléments finis pour la modélisation des phénomènes magnéto-thermiques couplés pour des géométries bidimensionnelles .

### Conclusion .

## CHAPITRE IV . Aide au concepteur : utilisation des techniques de systèmes experts .

### Introduction .

- IV.1 Apports des techniques de systèmes experts .
- IV.2 Etude de faisabilité d'un système expert conseil en modélisation .

### Conclusion .

## CONCLUSION

## BIBLIOGRAPHIE

\*\*\*\*\*

## INTRODUCTION



De plus en plus souvent, les opérations de chauffage avant forgeage et les traitements thermiques de matériaux électriquement conducteurs se font à l'aide d'installations de chauffage par induction. Ce choix est motivé par le bon rendement énergétique de ce procédé, sa propreté mais aussi sa souplesse d'utilisation. L'emploi de l'énergie électrique permet à tout moment de modifier facilement la puissance injectée dans la pièce à chauffer. Dans le contexte économique actuel, la productivité d'une chaîne de fabrication est primordiale et les installations de chauffage par induction ne répondent pas toujours à cette nécessité puisque, pour chaque nouveau type de pièce à traiter, l'inducteur est le plus souvent adapté empiriquement et le profil de puissance à injecter dans la pièce est obtenu par essais successifs. Cela entraîne une immobilisation de la ligne de production et des temps de réponse non négligeables.

L'intégration de l'induction dans les chaînes automatisées est donc nécessaire au développement de ce procédé et la conception assistée par ordinateur, basée sur une simulation numérique des phénomènes magnétiques et thermiques, devrait grandement faciliter cette opération. En effet, la prédiction du comportement magnétothermique de l'ensemble [pièce à chauffer-inducteur] permet d'optimiser aussi bien le dimensionnement d'un inducteur que le profil de puissance auquel doit être asservi le générateur dans le cas de l'adaptation d'une installation à un nouveau type de pièce à traiter. Grâce à l'emploi de cette technique, ces opérations ne devraient plus nécessiter l'interruption de la fabrication.

Pour remplir pleinement sa tâche, le système de C.A.O. doit satisfaire à des exigences de rapidité, d'interactivité et d'ergonomie. La méthode de simulation utilisée doit également être adaptée à la complexité du problème traité. L'utilisateur d'un système de C.A.O. pour installations de chauffage par induction peut alors choisir parmi un certain nombre de logiciels, celui qui est le mieux adapté à son travail, réduisant ainsi le coût et la durée du calcul.

De nombreuses études ont déjà abordé ce sujet et les systèmes de C.A.O. magnétiques, thermiques et même magnétothermiques existent. Cependant, le couplage important des phénomènes physiques en jeu impose de telles contraintes que l'utilisation de ces systèmes devient très difficile et même impossible si l'utilisateur ne possède pas une grande connaissance de la physique du problème et des méthodes numériques employées. La cause principale de cette inadaptation aux problèmes couplés est la genèse du système de C.A.O. qui, dans la quasi totalité des cas, est une extension d'un logiciel magnétique ou thermique. Aussi, pour

surmonter ces difficultés , il nous a semblé impératif de reconsidérer l'ensemble de la simulation de problèmes couplés et de définir un nouveau système de C.A.O. avec une structure orientée vers la résolution de ce type de phénomène et mettant en oeuvre des outils et des méthodes spécifiques.

Le travail exposé dans ce mémoire a consisté à élaborer simultanément ces outils et ces méthodes puis à les intégrer au sein de plusieurs logiciels de simulation numérique . Pour ce faire, l'étude des modèles et des méthodes numériques exposée au chapitre I, a permis de définir les principales difficultés et les axes de recherche à entreprendre durant cette thèse .

Les outils et les méthodes résultants de ces recherches sont décrits au chapitre II . Compte tenu de la nature des travaux réalisés, deux préoccupations principales ont guidé ce travail .

En ce qui concerne les outils , ils ont été développés dans le but d'améliorer les performances des systèmes de C.A.O. en optimisant les temps de calcul

- prédiction correction
- résolution en parallèle des divers systèmes d'équations
- prédiction correction croisée

et en offrant la possibilité de décrire des phénomènes complexes

- définition formelle des propriétés physiques
- calcul des flux de rayonnement multireflexion .

Les méthodes ont pour but d'aider le concepteur dans la description de son problème et dans la conduite de la simulation

- automate de résolution
- architecture à bibliothèques .

Le résultat de l'intégration de ces techniques dans deux logiciels de C.A.O. est exposé au chapitre III . Ces programmes constituent la base d'un

système qui devrait s'étoffer dans l'avenir au fur et à mesure de l'aboutissement des travaux de recherche sur les méthodes numériques et sur les résolutions de problèmes physiques précis .

Ce système devenant de plus en plus important et faisant intervenir un grand nombre de modèles et de méthodes différents, son utilisation risque de devenir très rapidement réservée aux experts en modélisation numérique, ce qui est contraire à l'objectif fixé . Pour permettre à l'utilisateur d'exploiter facilement cet outil d'aide à la conception , une étude de faisabilité d'un système expert conseil en modélisation a été entreprise . Les premiers résultats sont exposés au chapitre IV .





## **CHAPITRE I. Analyse synthétique de la modélisation numérique des phénomènes magnétothermiques.**

**\*\*\*\*\***



L'analyse détaillée des phénomènes mis en oeuvre dans les dispositifs de chauffage par induction, impose de prendre en compte le champ magnétique, le champ thermique ainsi que le couplage important qui lie ceux-ci.

Dans ce premier chapitre nous proposons de recenser les modèles numériques et les méthodes de résolution couramment utilisés lors de simulations numériques de ces deux phénomènes physiques. Nous avons également désiré mettre en évidence un certain nombre de difficultés techniques induites par le couplage de ces deux phénomènes, en indiquant brièvement comment ces problèmes peuvent être résolus lorsqu'une solution est connue, et en fournissant au lecteur des éléments bibliographiques susceptibles de préciser le détail des méthodes proposées. Les résultats de cette étude ont permis de dégager les principaux axes de recherche à entreprendre.



## 1.1 MODELISATION DES PHENOMENES MAGNETIQUES ET THERMIQUES.

La variation du champ magnétique au sein de pièces conductrices, induit des courants qui provoquent l'échauffement de ces pièces par effet Joule.

La présence de deux phénomènes distincts, magnétodynamique et thermique, complique la modélisation numérique d'autant plus que ceux ci sont étroitement couplés puisque :

- la source de chaleur dépend principalement de la valeur des courants induits.

- toutes les propriétés des corps sont fonction de la température ce qui influence sensiblement la répartition du champ magnétique.

Dans ce qui suit, nous exposerons les principaux modèles magnétiques et thermiques ainsi que les modélisations usuelles des variations des propriétés physiques avec la température.

### 1. Modélisation des phénomènes électromagnétiques.

Tous les phénomènes électromagnétiques, dans les installations de chauffage par induction, sont régis par les équations de Maxwell. Les vitesses ou les fréquences mise en jeu permettent de négliger totalement les courants de déplacement :  $\frac{\partial D}{\partial t}$  ;

$$[1] \quad \text{Rot} (E) = - \frac{dB}{dt}$$

$$[2] \quad \text{Rot} (H) = J$$

$$[3] \quad \text{Div} (B) = 0$$

$$[4] \quad \text{Div} (D) = q_e$$

$$[5] \quad B = \mu H + B_r$$

$$[6] \quad D = \epsilon E$$

$$[7] \quad J = \sigma E$$

avec les notations classiques

E	: champ électrique
D	: induction électrique
H	: champ magnétique
B	: induction magnétique
J	: densité de courant
q <sub>e</sub>	: densité de charges électriques
B <sub>r</sub>	: induction rémanente des aimants
μ	: perméabilité magnétique
ε	: permittivité diélectrique
σ	: conductibilité électrique.

a) Formulation en terme de quadrivecteur et les difficultés numériques qu'elle soulève.

Le fait que la divergence de B soit nulle permet de définir un potentiel vecteur A tel que  $B = \text{Rot}(A)$ . Ce potentiel ne peut être défini uniquement par cette relation, sa divergence doit également être fixée.

De même, un potentiel scalaire  $\phi$  peut être défini, à une constante près, à partir de la relation [1] par :

$$[8] \quad E + dA/dt = -\text{grad}(\phi)$$

Ces potentiels joints au choix de la condition de jauge  $\text{Div}(A) = \epsilon\sigma\mu \partial\phi/\partial t$  permettent de transformer les équations de Maxwell pour obtenir le système

$$[9] \quad \text{Rot}(\nabla \text{Rot}(A)) + \sigma \frac{dA}{dt} = -\sigma \text{grad}(\phi)$$

$$[10] \quad \epsilon\sigma\mu \partial\phi/\partial t - \text{Div}(\epsilon \text{grad}(\phi)) = q_e$$

La résolution numérique de ce modèle dans une géométrie tridimensionnelle pose de gros problèmes pratiques puisque quatre inconnues doivent être déterminées en chaque point. D'autre part, ce modèle est valable pour un système isolé complet et, si seule une partie du circuit est étudiée, de nouveaux problèmes surgissent car il faut connecter la partie étudiée au générateur extérieur dont les caractéristiques de fonctionnement influent sur l'ensemble du circuit. L'équation du circuit

générateur doit alors être ajoutée aux équations précédentes pour obtenir un modèle intégrodifférentiel dont la complexité est rarement compatible avec les techniques actuellement mises en oeuvre pour traiter les problèmes tridimensionnels.

Lorsque les charges sont nulles, ce qui est le cas dans la quasi totalité des dispositifs à induction,  $\sigma$  peut être considéré comme nul en dehors des circuits d'excitation et la jauge  $\text{Div} (A) = 0$  permet une première simplification du système.

$$[11] \quad \text{Rot}(\nabla \text{Rot}(A)) + \sigma \frac{dA}{dt} = -\sigma \text{grad}(\theta_{\text{ex}})$$

$$[12] \quad \text{Div}(A) = 0$$

Si on est capable de déterminer directement les courants injectés dans le dispositif, le système se simplifie encore en exprimant les sources sous la forme de courants d'excitation  $J_{\text{ex}} = -\sigma \text{grad}(\theta_{\text{ex}})$ .

$$[13] \quad \begin{aligned} \text{Rot}(\nabla \text{Rot}(A)) + \sigma \partial A / \partial t &= J_{\text{ex}} \\ \text{Div}(A) &= 0 \end{aligned}$$

**b) Le modèle magnétodynamique linéaire en terme de potentiel vecteur complexe.**

Si la perméabilité magnétique est indépendante de  $A$  et si les courants d'excitation  $J_{\text{ex}}$  sont sinusoïdaux, il est possible d'utiliser la représentation temporelle complexe de Fresnel. Le terme  $\sigma \partial A / \partial t$  peut alors être remplacé par  $j\omega\sigma A$  où  $j$  est le complexe imaginaire pur et  $\omega$  la pulsation des sources. La formulation devient :

$$[14] \quad \begin{aligned} \text{Rot}(\nabla \text{Rot}(A)) + j\omega\sigma A &= J_{\text{ex}} \\ \text{Div}(A) &= 0 \end{aligned}$$

Dans le cas de sources alternatives non sinusoïdales, il est possible de décomposer les signaux en série de Fourier et d'effectuer une étude pour chaque harmonique puis de recomposer ensuite les solutions obtenues. Dans le cas de signaux non continus (usuel avec les alimentations à électronique de puissance), le phénomène de Gibbs entraîne des erreurs inévitables et importantes sur les grandeurs locales (de l'ordre de 10%).



- c) Le modèle magnétodynamique bidimensionnel en terme de potentiel vecteur A.

Même simplifié, un modèle tridimensionnel conduit à déterminer trois inconnues en chaque point des pièces parcourues par des courants, ce qui entraîne des coûts de résolution importants. C'est pourquoi, lorsque la géométrie le permet, le recours à des modèles bidimensionnels peut très fortement diminuer ce coût tout en donnant d'excellents résultats.

Dans le cas d'une modélisation d'objets suffisamment longs ou possédant une symétrie de révolution, les courants sont généralement perpendiculaires au plan d'étude, ce qui a pour effet d'annuler les composantes de A situées dans le plan et de vérifier automatiquement la condition  $\text{Div}(A)=0$ . Le modèle général bidimensionnel devient

$$[15] \quad \text{Rot}(\nabla \text{Rot}(A)) + \sigma \partial A_z / \partial t = J_{ex_z}$$

Si une formulation complexe est possible le modèle

$$[16] \quad \text{Rot}(\nabla \text{Rot}(A)) + j\omega\sigma A_z = J_{ex_z}$$

est particulièrement simple et de résolution peu onéreuse.

- d) Modèles magnétodynamiques spécifiques aux domaines d'étude linéaires et dépourvus de courants d'excitation.

Lorsque le domaine d'étude est linéaire et dépourvu de courants d'excitation, la formulation [13] peut être modifiée en

$$[17] \quad \text{Rot}(H) + \sigma \partial A / \partial t = 0$$

En prenant le rotationnel de cette expression on obtient

$$[18] \quad \text{Rot}(\text{Rot}(H)) + \sigma\mu \partial H / \partial t = 0$$

Si les sources externes au domaine d'étude sont sinusoïdales

$$[19] \quad \text{Rot}(\text{Rot}(H)) + j\omega\sigma\mu H = 0$$

Si les hypothèses de restriction du domaine d'étude à une géométrie bidimensionnelle sont compatibles avec l'hypothèse de courants induits dans le plan d'étude, le champ  $H$  n'a plus qu'une composante perpendiculaire à la coupe analysée. Les équations ne concernent donc plus que  $H_z$ .

$$[20] \quad \text{Rot}(\text{Rot}(H)) + \sigma\mu \partial H_z / \partial t = 0$$

$$[21] \quad \text{Rot}(\text{Rot}(H)) + j\sigma\omega\mu H_z = 0$$

Cependant, ces équations ne peuvent être résolues que dans la mesure où il est possible de fournir, par un moyen quelconque, la valeur du champ  $H$  sur les limites du domaine étudié.

### 3. Modélisation des phénomènes thermiques.

L'équation des transferts de chaleur caractérise l'évolution thermique du système modélisé. Sa formulation est classique :

$$[22] \quad \rho C_p \frac{dT}{dt} + \text{Div}(-k \cdot \text{Grad}(T)) - q = 0$$

avec les notations usuelles :

- $\rho$  : masse volumique
- $C_p$  : chaleur massique
- $k$  : conductibilité thermique
- $q$  : densité de source thermique

A ceci il faut ajouter les conditions aux limites :

- la température est connue sur la paroi externe
- le flux de chaleur  $\phi = k \cdot \frac{d\theta}{dn}$  est connu sur la paroi car :
  - \* il est nul  $\phi = 0$
  - \* il est mesuré ou calculé par ailleurs  $\phi = f(t)$
  - \* il correspond aux pertes par convection  $\phi = -h \cdot (T - T_a)$
  - \* il correspond aux pertes par rayonnement sur l'ambiante  $\phi = -\epsilon\sigma(T^4 - T_a^4)$

avec les conventions classiques :

- $h$  : coefficient d'échange convectif
- $\epsilon$  : émissivité
- $\sigma$  : constante de Boltzmann
- $T_a$  : température ambiante .

Lorsqu'une partie du système se déplace, le modèle doit être complété par un terme de transport :

$$[23] \quad \rho C_p \frac{dT}{dt} + \rho C_p V \cdot \text{Grad}(T) + \text{Div}(-k \cdot \text{Grad}(T)) - q = 0$$

où  $V$  est la vitesse des pièces en mouvement .

#### 4. Modélisation des propriétés physiques .

Les variations des propriétés physiques en fonction de la température sont une des causes du couplage entre les phénomènes magnétique et thermique . Puisque d'autre part, elles sont sources de non linéarité pour le modèle thermique, elles doivent être modélisées pour pouvoir résoudre le système d'équations représentant les deux phénomènes couplés . Dans ce qui suit, nous ne traiterons que le cas particulier du passage du point de Curie qui, lors de la montée en température, représente la transition entre l'état magnétique et l'état amagnétique .

##### - Modèle de variation de la capacité calorifique .

Cette transition s'accompagne d'une chaleur latente de changement d'état, qui est le plus souvent modélisée par une augmentation importante de la capacité calorifique au passage du point de Curie .

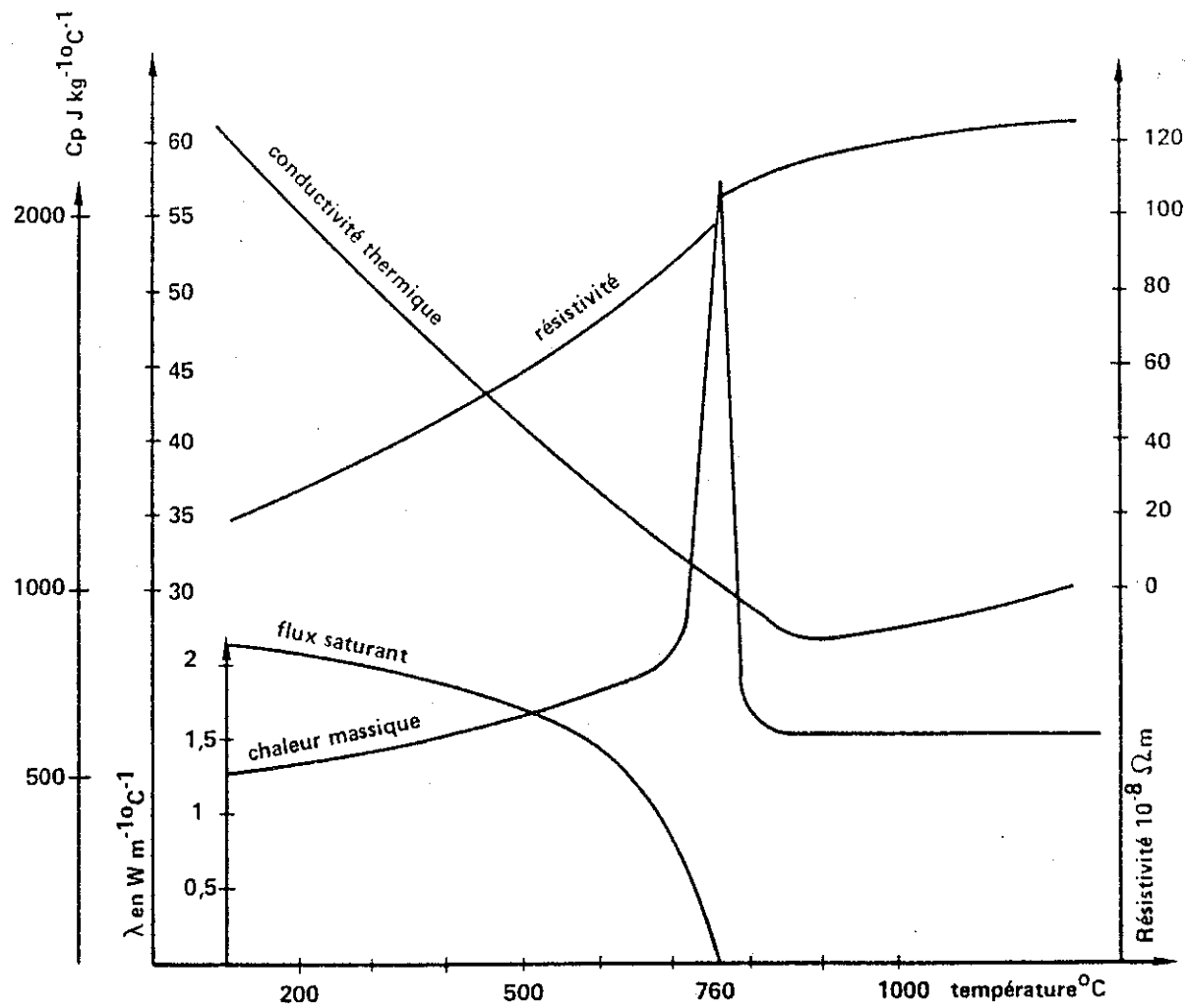


Figure I.1 Evolution des propriétés physiques avec la température.

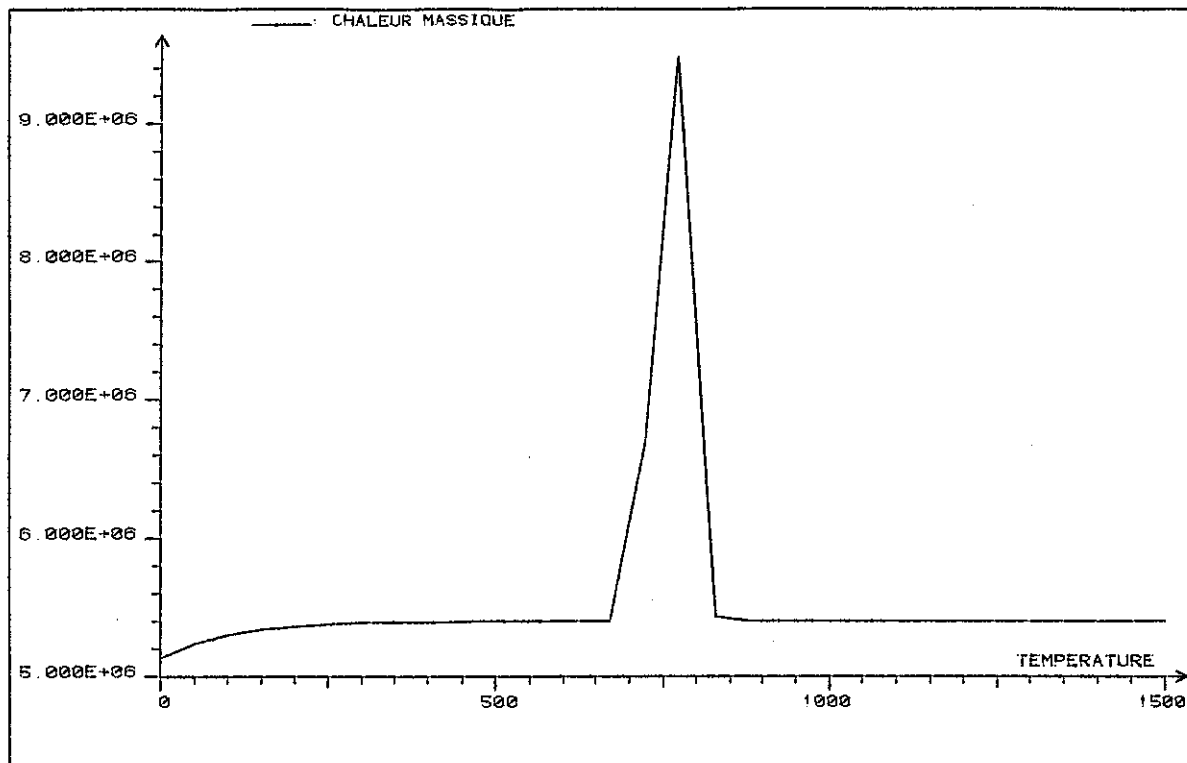


Figure I.2 Modélisation de l'évolution de la capacité calorifique au passage du point de Curie .

- Modèle de variation de la perméabilité magnétique .

Si la variation de la perméabilité magnétique en fonction du champ magnétique est bien connue grâce aux mesure de courbes d'aimantation, la dépendance envers la température l'est beaucoup moins alors que son importance est primordiale .

Comme le montre la figure I.3, l'induction saturante décroît très rapidement au passage du point de Curie . Le modèle le plus souvent utilisé consiste à séparer les dépendances en H et T dans la formulation de  $\mu$  .

$$[24] \quad \mu(H,T) = \mu(H) \cdot \alpha(T)$$

On obtient alors une surface  $B(H,T)$  constituée d'un réseau de courbes d'aimantation liées les unes aux autres par la courbe d'évolution de l'induction saturante  $\alpha(T)$  .

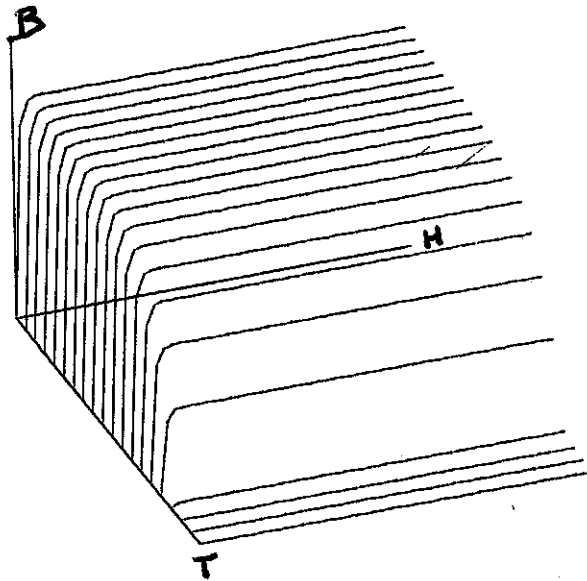


Figure I.3 Surface de modélisation de la perméabilité magnétique .

## 5. Choix des modèles .

Suite à cette étude nous pouvons conclure que si le choix du modèle thermique ne pose aucun problème, il n'en va pas de même pour le modèle magnétique . La description d'une méthodologie en la matière est toujours délicate, aussi nous nous contenterons d'indiquer quelques règles susceptibles de faciliter cette démarche .

(1) Par défaut, la géométrie est tridimensionnelle, les propriétés magnétiques sont non linéaires et dépendent de la température, les sources de courant sont non périodiques .

### Géométrie .

(2) Si le système possède une dimension infiniment longue par rapport aux deux autres :

=> modèle 2Dxy cartésien  $M(x,y)$  ,  $T(x,y)$

(3) Si le système admet une symétrie de révolution :

=> modèle 2Drz axisymétrique  $M(r,z)$  ,  $T(r,z)$

(4) Si le système possède deux dimensions infiniment longues par rapport à la troisième :

=> modèle 1Dx cartésien  $M(x), T(x)$

(5) Si le système admet une symétrie de révolution et la dimension en  $z$  est infiniment longue par rapport à la dimension en  $r$  :

=> modèle 1Dr axisymétrique  $M(r), T(r)$

### Propriétés physiques magnétiques.

(6) Si les propriétés physiques magnétiques sont linéaires et si les sources sont sinusoïdales :

=> modèle magnétique complexe  $M_c$

(7) Si les propriétés physiques magnétiques sont linéaires et si les sources sont périodiques non sinusoïdales :

=> modèle magnétique complexe  $M_c$

=> décomposition en série de Fourier

### Variable d'état magnétique.

(8) Si la géométrie est tridimensionnelle :

=> utilisation du potentiel vecteur  $A$  ( 3 composantes)

(9) Si la géométrie est bidimensionnelle et les courants induits sont perpendiculaires au plan de coupe :

=> utilisation du potentiel vecteur  $A_z$  ( 1 composante)

(10) Si la géométrie est bidimensionnelle et si les courants induits et les courants sources sont dans le plan et si les courants sources sont nuls sur le domaine d'étude :

=> utilisation du champ magnétique  $H_z$  ( 1 composante)

(11) Si la géométrie est monodimensionnelle et les courants induit sont perpendiculaires à la droite d'étude :

=> utilisation du potentiel vecteur  $A_z$  ( 1 composante)

(12) Si la géométrie est monodimensionnelle et si les courants induit sont perpendiculaires à la droite d'étude et les courants sources sont nuls :

=> utilisation du champ magnétique  $H_z$  ( 1 composante )



## 1.2 METHODES NUMERIQUES

Deux approches sont offertes au physicien ou à l'ingénieur qui désire résoudre un système d'équations aux dérivées partielles.

### 1. Les méthodes analytiques classiques.

Transformations conformes, méthode des images, séparation des variables, méthode des caractéristiques, elles s'avèrent d'application très délicate, voire impossible, dès que la complexité de la géométrie s'accroît et que certains matériaux possèdent des propriétés non linéaires. Ces méthodes sont, par contre, très efficaces pour traiter l'opérateur Laplacien dans des géométries simplifiées, cube, demi plan, cylindre infini etc....

Les formulations analytique, obtenues ( séries de fonctions ) ont l'avantage de la précision et de leur grande souplesse dans les traitements de dérivation ou d'intégration.

### 2. Les méthodes numériques.

Le recours à ces méthodes s'impose dès que la géométrie devient plus complexe et dès que les équations à résoudre sont non linéaires, soit du fait des opérateurs eux-mêmes ( cas de la mécanique des fluides ), soit du fait des propriétés des matériaux mis en oeuvre.

Toutes les méthodes numériques transforment les équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques exprimées aux noeuds d'un maillage qui discrétise le domaine d'étude.

Trois méthodes sont à l'heure actuelle utilisables pour réaliser ce traitement numérique :

- Les différences finies.
- Les éléments finis.
- Les intégrales de frontières.

#### a) Les différences finies.

Parmi toutes les techniques aujourd'hui utilisées, elle est la plus ancienne. En effet, son principe est directement fondé sur la définition

Néanmoins, cette méthode comporte quelques inconvénients majeurs.

\* Dès que l'équation à résoudre est non linéaire, l'intérieur de l'objet doit à nouveau être maillé pour tenir compte de la variation des propriétés.

\* Le résultat obtenu est constitué par l'inconnue sur les frontières uniquement, les valeurs internes doivent alors être évaluées au moyen d'une intégrale relativement coûteuse à calculer, alors que les méthodes des éléments finis et des différences finies fournissent très simplement les valeurs en tout point grâce à des interpolations directes.

\* Enfin, la matrice du système algébrique obtenue est pleine contrairement au cas des autres méthodes et, au regard de la précision, cela fait perdre bien des avantages gagnés au préalable par la réduction du nombre d'inconnues.

Il ressort de cette analyse que pour l'instant, cette méthode est essentiellement appliquée à la résolution d'équations linéaires sur des domaines de formes complexes dans des cas où l'exploitation des résultats se limite à quelques évaluations internes des inconnues.

### 3. Choix de la méthode.

De même que pour le choix des modèles, la description d'une méthodologie de choix de la méthode est très délicate. Nous n'indiquerons que quelques règles susceptibles d'aider le concepteur dans son travail.

(1) Si une méthode analytique est possible, elle est préférable à tout autre méthode numérique.

(2) Si la géométrie peut être maillée régulièrement  
=> méthode des différences finies préférable.

(3) Si les propriétés physiques sont linéaires et si l'équation à résoudre est celle de la diffusion et si seules les valeurs de l'inconnue sur les frontières sont intéressantes  
=> méthode intégrale préférable.

(4) Si la méthode intégrale est possible, elle est préférable à la méthode des éléments finis et à la méthode des différences finies.

(5) Si la méthode des différences finies est possible, elle est préférable à la méthode des éléments finis.

### I.3 DIFFICULTES DE MODELISATION DES PHENOMENES COUPLES MAGNETOTHERMIQUES.

Dans cette partie, nous proposons de mettre en évidence certaines difficultés rencontrées lors de la modélisation numérique des phénomènes magnéto-thermiques couplés. Nous aborderons chaque problème de façon très générale et nous renverrons le lecteur à des éléments bibliographiques qui lui permettront de consulter le détail des solutions proposées.

#### a) Difficultés d'ordre topologique.

Lors d'une modélisation d'une installation de chauffage par induction, deux domaines d'étude sont concernés par les phénomènes magnétiques et thermiques. Le plus souvent, le domaine d'étude thermique est une partie du domaine magnétique, ce qui a pour conséquence une définition impossible du modèle thermique sur l'ensemble du domaine d'étude.

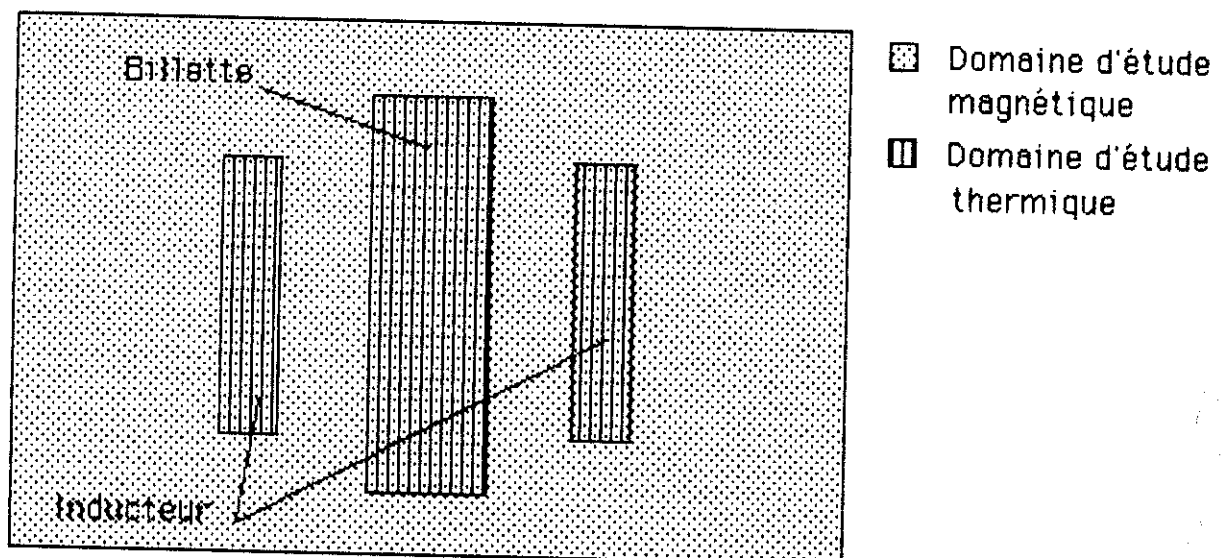


Figure I.4 Les différents domaines d'étude.

Pour résoudre ce problème, deux techniques sont actuellement utilisées.

La première consiste à utiliser deux grilles différentes et à interpoler les valeurs aux noeuds pour tenir compte du couplage des équations [1].

La seconde consiste à éliminer les équations, là où elles ne sont pas définies, en fixant la valeur de la variable d'état aux noeuds par une condition de Dirichlet [15].

#### b) Difficultés d'ordre temporel.

Les constantes de temps des deux phénomènes en présence sont d'ordre très différent puisque, si l'évolution thermique est relativement lente (constante de temps de l'ordre de la seconde), les fréquences utilisées en traitement thermique peuvent atteindre quelques centaines de kilohertz. Aussi la modélisation au cours du temps des deux phénomènes couplés devra choisir comme pas de temps celui qui est imposé par le phénomène le plus rapide (ici le magnétique). Cela conduit à résoudre l'équation thermique beaucoup plus souvent que l'évolution du phénomène ne l'impose, alourdissant de ce fait le temps de calcul et le coût de la simulation.

Nous avons vu que, lorsque la perméabilité magnétique était linéaire et les sources sinusoïdales, la formulation complexe supprimait le terme temporel du modèle magnétique. Cela permet alors de choisir comme pas de calcul celui imposé par le phénomène thermique, mais la présence d'inconnues de type réel et de type complexe dans le même système constitue un handicap sérieux lors de la résolution.

Une solution consisterait à résoudre les systèmes d'équation séparément grâce à une stratégie qui assurerait un bon couplage en imposant les instants de résolution des différents phénomènes physiques et en effectuant le calcul des valeurs des propriétés physiques en fonction des diverses variables d'état (Cf II.2).

Enfin, dans le cas d'une perméabilité magnétique non linéaire (matériau saturable), l'utilisation de la méthode des perméabilités équivalentes permet de se ramener au cas linéaire [12,14].

Dans le cas de très hautes fréquences, l'épaisseur de peau est tellement faible comparée aux dimensions du domaine d'étude que les méthodes éléments finis et différences finies ne sont plus utilisables pour la résolution du système magnétique. Lorsque cela se révèle possible, les méthodes d'intégrales de frontières [11] ou de décomposition en spires élémentaires [40] pourront apporter une solution. Si tel n'est pas le cas, l'utilisation d'un macro-élément "épaisseur de peau" pourra également être

magnétiques industriels sont très mal connues , notamment lors du passage du point de Curie [34].

A partir de mesures effectuées sur un matériau magnétique, des modèles analytiques ont été développés [33]. Ils sont facilement utilisables lors du calcul de la matrice Jacobienne pour la méthode de Newton Raphson, car leur dérivée est également analytique.

#### e) Difficultés posées par les pièces en mouvement .

Bien souvent, la pièce traitée dans une installation de chauffage par induction est en mouvement ( chauffage au défilé ... ). La modélisation de ce phénomène de transport de masse nécessite de modifier la formulation thermique (Cf I.1), mais aussi de redéfinir le maillage et les fonctions d'interpolation à chaque pas de temps de la simulation . Si la première modification n'a pour effet que l'obtention d'une matrice dissymétrique dans le cas d'une résolution éléments finis, la seconde impose un nombre d'opérations supplémentaires non négligeable ( définition d'un nouveau maillage, transformation des valeurs de l'inconnue de l'ancienne grille sur la nouvelle grille ... ) . La dualité mouvement de la pièce - variation des sources peut dans certains cas être utilisée pour figer la pièce en se plaçant dans le référentiel lié à celle ci et remplacer le mouvement de la source par une variation temporelle de son amplitude . Une étude de définition de la variation temporelle des propriétés physiques doit donc être entreprise ( Cf II.5) .

Lorsque cette méthode n'est pas utilisable, un macro-élément de friction peut être utilisé pour relier la partie du maillage qui reste statique à celle qui est en mouvement de façon à minimiser au maximum les opérations supplémentaires nécessaires . Dans ce cas, la formulation de l'équation doit être linéaire dans la zone de friction .

## CONCLUSION

De la description des différents modèles et des différentes méthodes numériques, il résulte que le choix optimum du couple modèle-méthode, pour un problème donné, nécessite une connaissance approfondie difficilement accessible aux non spécialistes en modélisation. D'autre part, l'étude des difficultés de modélisation des phénomènes couplés magnéto-thermiques a permis de constater que si de nombreuses réponses étaient apportées par la littérature, certains problèmes, à notre connaissance, n'avaient pas trouvé de solution réellement satisfaisante.

Le travail de recherche devait donc consister dans un premier temps à élaborer des méthodes et des outils pour pallier ces dernières difficultés, les inclure dans des logiciels de C.A.O, puis étudier une solution qui rende ces systèmes facilement accessibles aux néophytes en modélisation numérique.



## **CHAPITRE II . Des méthodes et des outils pour la modélisation numérique des phénomènes couplés .**

**\*\*\*\*\***





## INTRODUCTION.

Dans ce deuxième chapitre, nous décrivons, dans le détail, les apports théoriques et techniques qui sont le fruit de notre travail personnel . Ils ont permis la réalisation concrète de quelques outils généraux, désormais disponibles pour aider le concepteur de logiciels de C.A.O. à résoudre certains problèmes délicats posés par la résolution des équations aux dérivées partielles couplées, notamment en magnétothermie .

Nous avons mis en application ces méthodes et ces outils au sein de logiciels qui seront décrits au troisième chapitre .



## II.1 - ETUDE DE L'ALGORITHME DE PREDICTION CORRECTION POUR UNE SIMULATION NUMERIQUE EVOLUTIVE.

### I. Principe de la méthode .

Dans le cas d'une résolution en pas à pas sur le temps, l'étude comparée des méthodes utilisables (- explicite - implicite - Krank-Nicholson) nous a conduits à choisir la solution implicite qui possède l'avantage d'être inconditionnellement stable, jointe à une résolution du système non linéaire par la méthode de Newton-Raphson . Une telle résolution est très sensible au choix des valeurs de départ ( possibilité de divergence, coût important dans le cas d'un départ loin de la solution ), aussi est-il nécessaire de l'optimiser par une méthode de prédiction . Le nombre de calculs étant directement lié à la valeur du pas de temps, une optimisation de ce dernier par une méthode corrective permettra d'alléger substantiellement le coût d'une résolution en contrôlant sa convergence . L'idée de base de l'algorithme de prédiction correction consiste à utiliser l'historique de l'évolution du système physique simulé pour calculer une valeur approchée de la solution grâce à une méthode explicite à pas liés, puis de corriger la valeur obtenue à l'aide d'un schéma implicite, économisant ainsi un certain nombre d'itérations . L'erreur commise entre la solution prédite et la solution calculée nous permet d'apprécier l'évolution du système et ainsi d'agir sur la valeur du pas de temps .

### 2. Etude numérique .

Nous exposons dans ce qui suit les calculs correspondant à une méthode de prédiction correction du second ordre .

#### a) Utilisation de la méthode explicite à pas liés : prédiction .

Considérons un problème de variable d'état  $A$  dont nous connaissons les solutions aux pas de temps  $n-2$ ,  $n-1$  et  $n$  . Il nous est possible par un développement en série de Taylor de prédire la solution au pas  $n+1$  :

$$* A_{n+1} = A_n + \Delta t_n \cdot A'_n + \Delta t_n^2 / 2! \cdot A''_n + \Delta t_n^3 / 3! \cdot A'''_n \quad (1)$$

$$* A'_{n-1} = A'_n - \Delta t_{n-1} \cdot A''_n + \Delta t_{n-1}^2 / 2! \cdot A'''_n \quad (2)$$

avec  $-\Delta t_{n-1}$  pas de temps entre  $A_{n-1}$  et  $A_n$   
 $-\Delta t_n$  pas de temps entre  $A_n$  et  $A_{n+1}$

L'utilisation d'un schéma du 2ème ordre conduit à négliger les termes  $A_n'''$

$$* A_{pn+1} = A_n + \Delta t_n \cdot A'_n + \Delta t_n^2 / 2 \cdot [A'_n - A'_{n-1}] / \Delta t_{n-1} \quad (3)$$

où  $A_{pn+1}$  représente la valeur prédite.

L'évaluation de l'erreur de prédiction  $E_{pn+1} = A_{n+1} - A_{pn+1}$  peut se déduire de (3). Dans cette expression,  $A_{n+1}$  représente la solution exacte du système.

$$* E_{pn+1} = \Delta t_n^2 \cdot (\Delta t_{n-1} / 4 + \Delta t_n / 3) \cdot A'''_n \quad (4)$$

b) Utilisation de la méthode implicite : correction.

L'utilisation d'un schéma implicite permet d'obtenir des équations similaires.

$$* A_{n+1} = A_n + \Delta t_n \cdot A'_{n+1} - \Delta t_n^2 / 2! \cdot A''_{n+1} + \Delta t_n^3 / 3! \cdot A'''_{n+1} \quad (5)$$

$$* A'_n = A'_{n+1} + \Delta t_n \cdot A''_{n+1} - \Delta t_n^2 / 2! \cdot A'''_{n+1} \quad (6)$$

$$* A_{c,n+1} = A_n + \Delta t_n \cdot A'_{n+1} - \Delta t_n / 2 \cdot [A'_{n+1} - A'_n] \quad (7)$$

où  $A_{c,n+1}$  représente la valeur corrigée.

$$* E_{c,n+1} = - \Delta t_n^3 / 12 \cdot A'''_n \quad (8)$$

où  $E_{c,n+1}$  est une évaluation de l'erreur commise sur  $A_{c,n+1}$

## c) Evaluation de l'erreur et calcul du pas de temps optimal

En supposant que  $A''_{n+2}$  soit peu différent de  $A''_{n+1}$ , il est possible de calculer  $E_{c,n+2}$  à partir de  $E_{c,n+1}$ ,  $\Delta t_{n+1}$  et  $\Delta t_n$  à l'aide de (4, 8).

$$* E_{c,n+2} / E_{c,n+1} = \Delta t_{n+1} / \Delta t_n \quad (9)$$

$$* E_{n+1} = \frac{A_{c,n+1} - A_{p,n+1}}{3 \cdot (1 + \Delta t_{n-1} / \Delta t_n)} \quad (10)$$

La majoration de l'erreur au pas  $n+2$  ( $E_{c,n+2}$ ) par la valeur prédéfinie  $E$ , impose une valeur maximale pour le pas de temps  $\Delta t_{n+1}$ .

$$* \Delta t_{n+1} = \Delta t_n \sqrt[3]{E / E_{n+1}} \quad (11)$$

Cette méthode fournit la possibilité "d'autoadapter" le pas de temps au cours de la simulation. Si la valeur de  $\Delta t_{n+1}$  est supérieure à la valeur de  $\Delta t_n$ , l'évolution du système est suffisamment lente pour que la précision demandée soit compatible avec ce pas de temps. Par contre, si  $\Delta t_{n+1}$  est inférieur à la valeur de  $\Delta t_n$ , la rapidité de l'évolution du système entraîne une erreur de calcul supérieure à la valeur permise. Dans ce cas, un seuil peut être défini,  $\alpha = \Delta t_{n+1} / \Delta t_n$ , en dessous duquel le calcul au pas  $n+1$  devra être repris avec comme nouveau pas de temps  $\Delta t_n$ , la valeur de  $\Delta t_{n+1}$ . Si, au bout d'un certain nombre de calculs au pas  $n+1$ ,  $\Delta t_{n+1}$  est toujours inférieur à  $\alpha \Delta t_n$ , on peut en conclure que le système diverge et la résolution doit alors être interrompue.

## 3. Avantages de cette méthode sur un exemple : l'équation thermique.

La comparaison des modes de résolution avec et sans prédiction correction permet d'apprécier les avantages que procure cette méthode. Le problème résolu est la chauffe d'une pièce de métal magnétique à source thermique constante. La modélisation de la chaleur latente de changement d'état magnétique-amagnétique par un accroissement de la capacité calorifique au voisinage du point de Curie, rend ce problème fortement non linéaire lors de cette transformation.

- évolution physique du système .

La montée en température de la pièce est à peu près linéaire avant le point de Curie, un palier dû à l'augmentation de la capacité calorifique est observé à ce point puis le système tend vers une température limite pour laquelle l'énergie dissipée par rayonnement est équivalente à celle produite par la source thermique : le régime permanent est alors atteint .

- résolution sans prédiction correction .

Pour l'utilisateur d'un système de résolution classique, deux voies sont possibles . La première consiste à lancer le système de façon autonome en choisissant a priori le pas de temps maintenu constant tout au long de la simulation. Dans ce cas, la valeur choisie doit être compatible avec la plus forte variation du système pour assurer une bonne précision et une stabilité de la résolution, imposant de ce fait un coût de calcul prohibitif . La seconde méthode consiste à découper la période de simulation en intervalles et à choisir un pas de temps compatible pour chacun de ceux ci . Le nombre de pas de calcul se trouve alors réduit, mais cette méthode nécessite de la part de l'utilisateur une bonne connaissance de la physique du phénomène simulé et des problèmes numériques, diminuant grandement l'autonomie du système .

- résolution avec prédiction correction

L'autoadaptation du pas de temps par la prédiction correction en fonction de l'évolution du système rend ce dernier totalement autonome l'utilisateur se contentant de déterminer la valeur du pas initial . Cette adaptation du pas est visible sur la figure II.1 .

#### 4. Mise en oeuvre pratique de l'algorithme .

Nous résumons dans ce paragraphe, la connaissance empirique que nous avons acquise sur cette méthode au cours de nos expérimentations .

Le travail de comparaison des performances de la méthode du second ordre et de la méthode du premier ordre nous a conduits à préférer la première solution qui présente l'avantage d'être plus précise et réduit les oscillations du pas de temps [27] .

Pour limiter davantage ces oscillations, une réduction de la valeur du pas à l'instant  $t_n$  interdit une augmentation de cette valeur au pas de calcul immédiatement suivant,  $t_{n+1}$  .

La solution prédite est habituellement utilisée comme point de départ

de la méthode de Newton-Raphson dans le but d'économiser un nombre important d'itérations. Néanmoins, si la valeur du pas de temps vient d'être réduite au pas précédent, l'expérience a montré qu'il était préférable d'adopter la valeur de la solution au pas précédent plutôt que d'utiliser la valeur prédite. En effet une forte variation de la dérivée implique une grande variation de la valeur prédite et constitue donc un mauvais point de départ. Par contre, le contrôle de la précision reste correct.

Le nombre maximum de retour arrière pour un indice de pas de temps donné est fixé à quatre. Si ces quatre résolutions ne suffisent pas, un message avertit l'utilisateur que le système ne converge pas et la simulation est arrêtée.

En conclusion, nous pouvons dire que cette méthode correspond aux deux objectifs que nous nous sommes fixés. Elle permet d'optimiser fortement temps et coûts de simulation en fournissant à l'utilisateur un moyen de simuler des phénomènes transitoires, sans nécessairement connaître la physique du problème d'une façon approfondie.

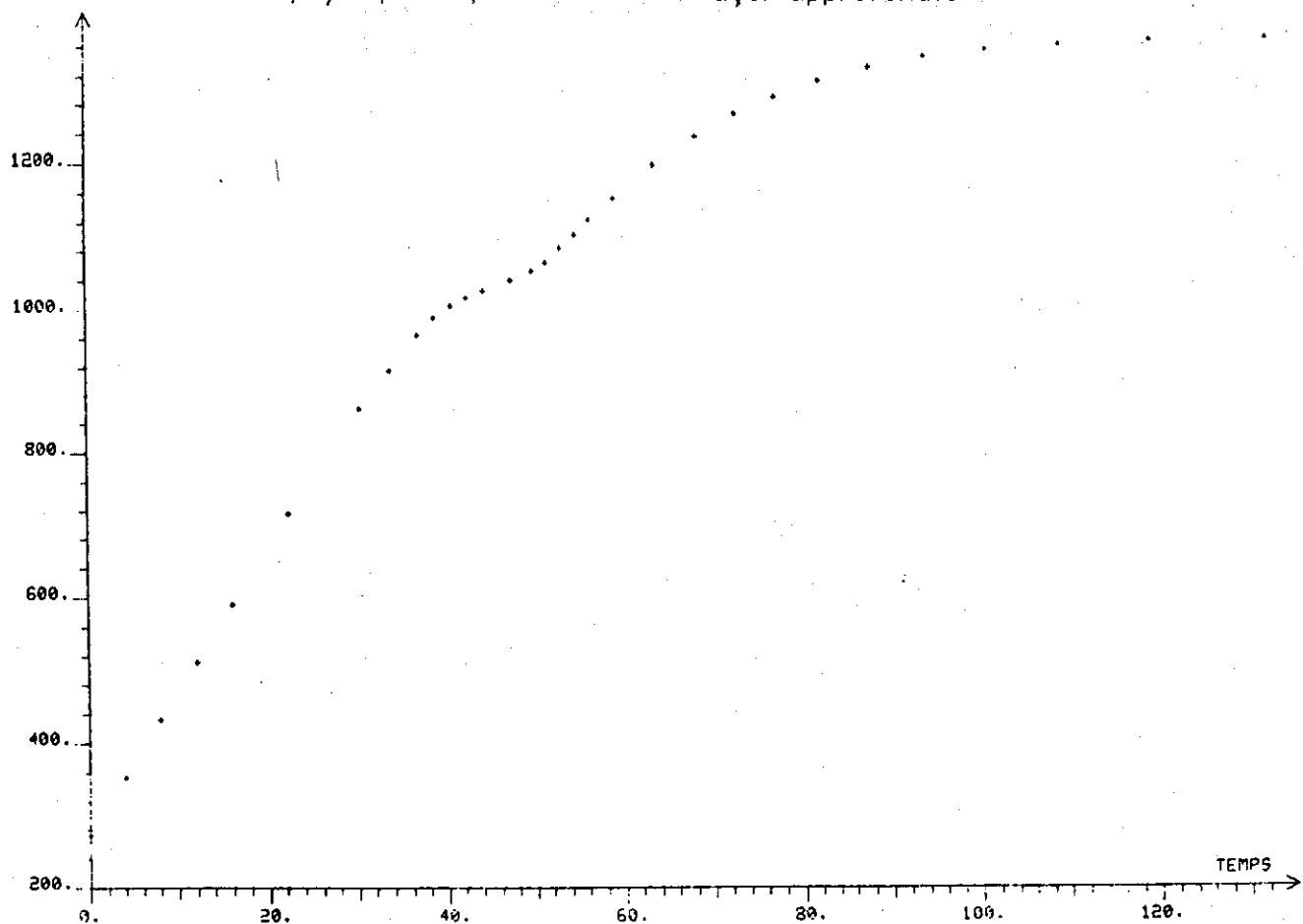


Figure II.1

Visualisation de l'évolution de la température avec passage du point de Curie. Chaque croix représente un instant de la simulation.



## II.2 - ETUDE D'UNE STRATEGIE DE RESOLUTION DE PHENOMENES COUPLES COORDONNEE PAR UN GRAFCET.

### 1. Introduction.

La modélisation numérique d'un problème couplé nécessite la résolution simultanée de plusieurs équations ( magnétique, thermique, mécanique, hydraulique ). Une première méthode de simulation consiste à résoudre un système composé de toutes ces équations avec un pas de temps imposé par le phénomène physique le plus rapide . Cette méthode, si elle tient parfaitement compte du couplage entre les équations, utilise un système matriciel très important et conduit à un coût d'utilisation prohibitif . Une autre solution consistant à traiter parallèlement chaque phénomène physique, modélisé séparément, a été préférée puisqu'elle supprime la lourdeur de la première méthode . Par contre, une coordination des résolutions devient nécessaire pour assurer un couplage correct .

La stratégie de résolution ( lancement des différentes tâches ) peut être confiée à un automate qui assure l'enchaînement des résolutions successives et effectue les divers couplages entre les différentes équations . Cet automate séquentiel visualise sur écran graphique l'état de chaque tâche permet de contrôler le bon déroulement de la simulation .

### 2. Description de la séquence de résolution d'un problème couplé .

Considérons un problème composé de trois équations a, b, c couplées . Chaque équation, par ses caractéristiques physiques ( propriétés physiques variables, source évolutive ), possède un pas de temps qui lui est propre,  $\Delta t_a - \Delta t_b - \Delta t_c$  . L'utilisation de l'algorithme de prédiction correction autorise chaque phénomène à s'autopiloter, c'est à dire à définir un pas de temps de résolution adapté à l'évolution du phénomène . Dans le cas d'un système couplé, à la suite d'un calcul d'une variable d'état ayant entraîné une variation importante de celle ci, il peut être nécessaire de calculer une autre variable d'état alors que la prédiction correction ne prévoyait pas cette résolution (exemple du passage du point de Curie et de la dépendance du phénomène magnétique envers la température ) . Il nous a donc fallu mettre au point une stratégie de résolution, tenant compte des indications données par la prédiction correction sur chaque phénomène mais aussi de l'interdépendance des résolutions .

Supposons qu'à l'instant  $t_n$ , les valeurs des trois variables d'état A, B et C soient connues. La prochaine étape de la simulation consiste à calculer l'état du système à l'instant  $t_{n+1} = t_n + \Delta t$  où  $\Delta t$  est la valeur du pas de temps le plus faible parmi  $[\Delta t_a, \Delta t_b, \Delta t_c]$ ,  $\Delta t_i$  représentant la quantité  $t_{ip} - t_n$  où  $t_{ip}$  est l'instant de la prochaine résolution de l'équation  $i$  choisi par la prédiction correction sur  $i$ . Supposons que  $\Delta t_c$  soit ce pas de temps, l'équation C est résolue à partir des valeurs de C en  $t_n$  mais aussi des valeurs de A et B en  $t_n$  (couplage). Après convergence, la variation  $\Delta C$  de la variable C entre l'instant  $t_n$  et  $t_{n+1}$  peut se révéler faible pour un système peu évolutif, mais peut également être importante et entraîner, du fait du couplage, des variations conséquentes pour les variables d'état A et B. Dans ce cas, une résolution des équations a et b devient nécessaire à l'instant  $t_{n+1}$ .

Le test de la valeur de  $\Delta C$  impose la définition des seuils  $\Delta C_a$  et  $\Delta C_b$  (respectivement  $\Delta B_a, \Delta B_c, \Delta A_b, \Delta A_c$ ) tels que

$\Delta C > \Delta C_a \Rightarrow$  nouvelle résolution de a.

$\Delta C > \Delta C_b \Rightarrow$  nouvelle résolution de b.

Si  $\Delta C < \Delta C_a$  et  $\Delta C < \Delta C_b$ , la résolution à l'instant  $t_{n+2}$  peut être entreprise. Dans le cas contraire, l'équation a ou l'équation b doit être résolue pour s'assurer que la variation de C n'entraîne pas des variations excessives des variables A et B. La résolution en  $t_{n+1}$  de a revient alors à considérer que  $t_{n+1}$  est un pas de temps pour la simulation de a. Il est donc nécessaire d'incrémenter le nombre de résolution de a pour permettre une mise à jour de  $\Delta t_a$  et l'utilisation de la méthode de prédiction correction.

Après résolution, les valeurs de  $\Delta a$  et  $\Delta b$  sont testées pour s'assurer de leur compatibilité avec la résolution de c effectuée auparavant. Dans l'affirmative, le problème peut être considéré comme résolu à l'instant  $t+1$ . Dans le cas contraire, une nouvelle résolution de c sera nécessaire à partir des valeurs de C à  $t_n$  et des nouvelles valeurs de A et B à  $t_{n+1}$ . Elle sera traitée de la même manière que la précédente et le rebouclage des résolutions sera effectué jusqu'à ce que les tests  $\Delta_{ij}$  soient tous négatifs. Cependant, si après un certain nombre de rebouclages le système ne converge pas, la simulation est arrêtée.

Cet algorithme de résolution est représenté figure II.2. Il permet d'économiser un grand nombre de résolutions par rapport à une stratégie classique qui utilise un pas de temps constant correspondant au phénomène physique le plus rapide.

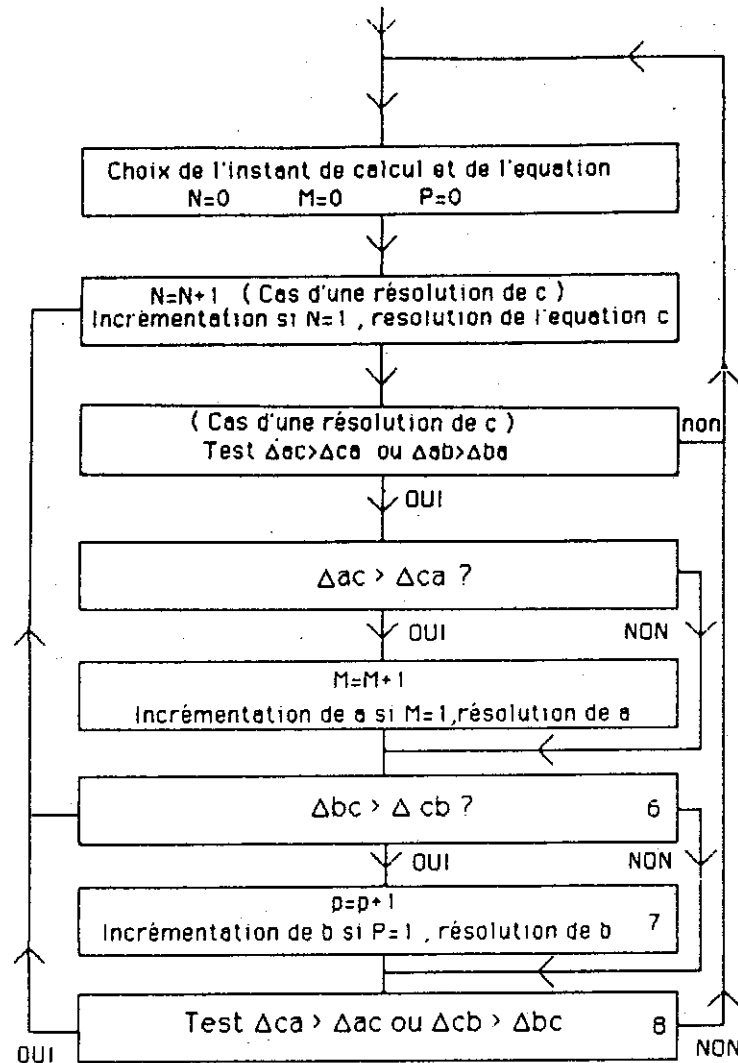


Figure II.2 Algorithme simplifié de la séquence de résolution d'un problème couplé.

### 3. Utilisation du langage GRAFCET.

La stratégie de résolution d'un problème couplée est constituée d'une suite de tâches organisée séquentiellement. Elle peut donc être décrite au moyen d'un langage destiné aux automates séquentiels, le GRAFCET, ce qui aura pour conséquence de la rendre aisément programmable et d'un emploi plus souple.

## a) Définition des principales étapes .

Considérons un phénomène physique d'équation  $a$ , de variable d'état  $A$ . A la résolution de cette équation, trois tâches peuvent être associées :

- \* Init.a : représentant l'initialisation de la résolution de l'équation  $a$ .
- \*  $a+1$  : représentant l'incrémentatation du pas de temps de la résolution de  $a$ .
- \*  $a$  : représentant la résolution de l'équation  $a$  au pas de temps défini.

Deux tâches, indépendantes des phénomènes physiques, doivent également être créées :

- \* Alarme : Indication à l'utilisateur que la résolution d'un système n'a pas convergé dans les limites prédéfinies.
- \* Arrêt : Fin de la séquence de résolution suite à une convergence de tous les phénomènes vers leur état permanent, ou suite à une détection d'une alarme.

Enfin, la gestion des banques impose deux tâches supplémentaires :

- \* Init.G : Initialisation des banques générales.
- \*  $G+1$  : Incrémentatation générale.

A partir de ceci, les actions ou tâches que devra gérer un automate de résolution correspondant à un problème couplé de trois variable  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , se définissent facilement. Chaque action est associée à une étape du Grafcet qui porte son nom.

Init.a	Init.b	Init.c	Init.G	⇒ Initialisation
$a+1$	$b+1$	$c+1$	$G+1$	⇒ Incrémentatation
$a$	$b$	$c$		⇒ résolution
		Alarme		⇒ Alarme
		Arrêt		⇒ Arrêt

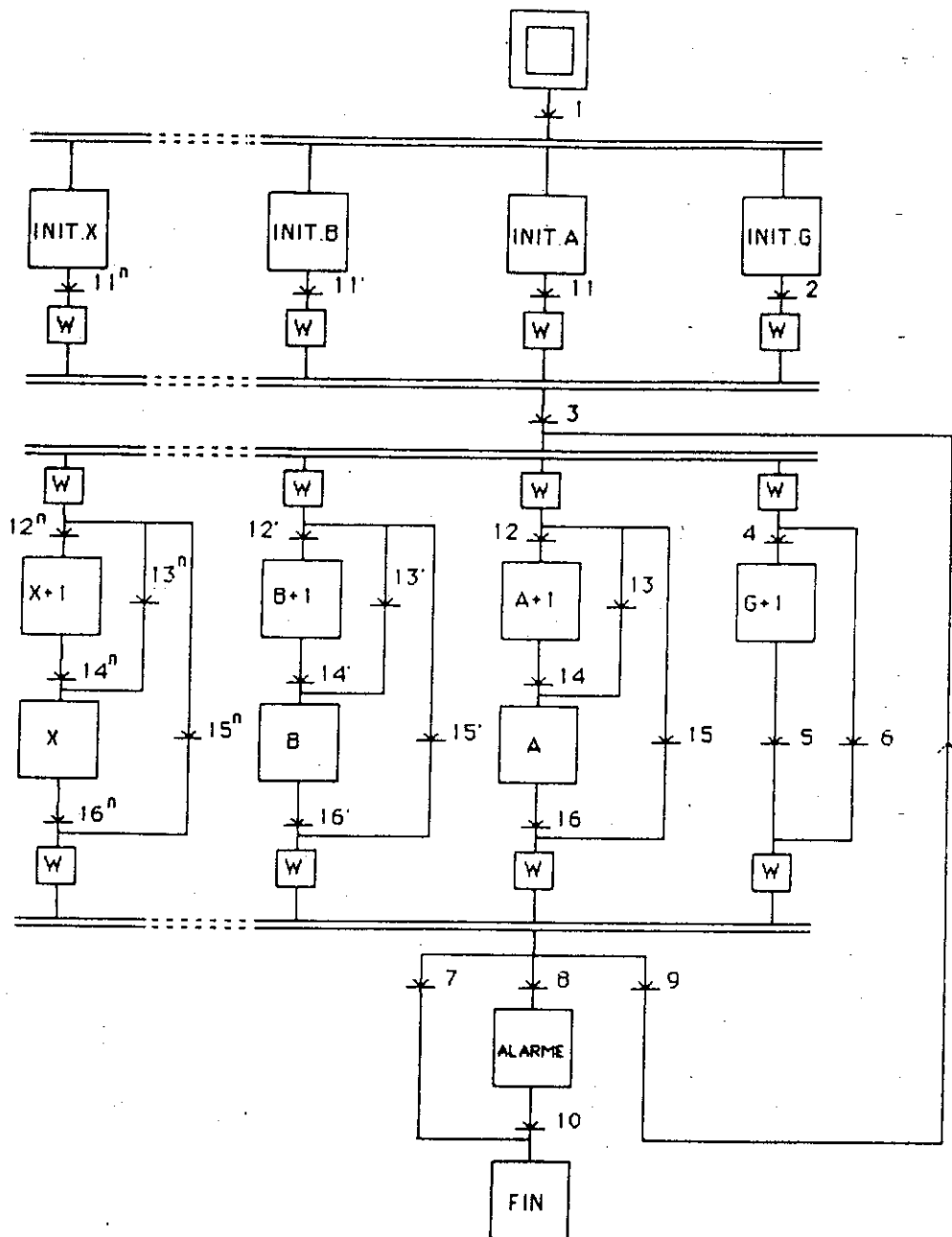


Figure 11.3      Grafcet de l'automate de résolution d'un problème à trois variables couplées.

## b) Définition du graphe .

La liste exhaustive des étapes permet de mettre en place le graphe en tenant compte de plusieurs contraintes .

- Le graphe doit être aisément extensible à un problème couplé de  $n$  variables d'état . Ceci impose pour chaque phénomène physique, une structure autonome et facilement duplicable .

- Les diverses résolutions nécessitant des temps d'exécution différents, les tâches doivent être synchronisées au moyen d'étapes d'attente .

- La structure du graphe doit permettre un calcul des différents problèmes en parallèle .

## c) Définition des transitions et des réceptivités associées aux transitions.

La description sous forme d'un Grafcet de la séquence de résolution nécessite de décrire le graphe mais également les conditions de transition d'une étape vers une autre qui orienteront l'automate vers une tâche plutôt qu'une autre . Ces conditions, ou réceptivités, sont des combinaisons logiques d'indicateurs de l'état du système commandé et d'indicateurs de l'état du graphe ( étapes validées ) . Il convient désormais de décrire ces transitions et réceptivités pour traduire correctement la séquence de résolution .

Après numérotation, les transitions peuvent être regroupées en différentes classes :

1	Départ ---]---- Init	Début de la simulation .
2	Init.G ---]---- Attente	Fin d'initialisation générale .
3	Attente ---]---- Attente	Synchronisation .
4	Attente ---]---- G+1	Nécessité d'incrémenter la base de données générale .

5	G+1	---}]--- Attente	fin d'incrémentation générale.
6	Attente	---}]--- Attente	aucune nécessité d'incrémenter la base de données générale.
7	Attente	---}]--- Fin	une des résolutions a dû être stoppée.
8	Attente	---}]--- Alarme	une des résolution n'a pas convergé.
9	Attente	---}]--- Attente	nécessité d'un nouveau calcul.
10	Alarme	---}]--- Fin	nécessité d'interrompre la simulation après une alarme.
11 11' 11 <sup>n</sup>	Init.x	---}]--- Attente	fin d'initialisation du problème x.
12 12' 12 <sup>n</sup>	Attente	---}]--- x+1	une résolution de x est nécessaire à cet instant et c'est la première résolution de x à cet instant.
13 13' 13 <sup>n</sup>	Attente	---}]--- x	une résolution de x est nécessaire à cet instant et ce n'est pas la première résolution de x à cet instant.
14 14' 14 <sup>n</sup>	x+1	---}]--- x	fin d'incrémentation du problème x.
15 15' 15 <sup>n</sup>	Attente	---}]--- Attente	une résolution de x n'est pas nécessaire à cet instant de la simulation.

16 16' 16<sup>n</sup> x ---]---Attente fin de la résolution de l'équation x.

Les formulations logiques des réceptivités associées peuvent s'énoncer de la façon suivante, avec les conventions usuelles de la logique.

- 1 M
- 2 FINIT.G
- 3 1
- 4  $A.1A + B.1B + \dots + X.1X$
- 5  $\text{FING}+1$
- 6  $\frac{A.1A + B.1B + \dots + X.1X}{\text{STOPA} + \text{STOPB} + \dots + \text{STOPX} + \text{PERMANENT} +}$
- 7  $\frac{A + B + \dots + X}{\text{DIVA} + \text{DIVB} + \dots + \text{DIVX} + \text{DIVG}}$
- 8  $\frac{\text{STOPA} + \text{STOPB} + \dots + \text{STOPX} + \text{PERMANENT}}{\text{DIVA} + \text{DIVB} + \dots + \text{DIVX} + \text{DIVG}}$
- 9 1
- 10 11 11' 11<sup>n</sup> FINIT.X
- 11 12 12' 12<sup>n</sup> X.1X
- 12 13 13' 13<sup>n</sup>  $\frac{X.1X}{\text{FINX}+1}$
- 13 14 14' 14<sup>n</sup>  $\frac{\text{FINX}+1}{X}$
- 14 15 15' 15<sup>n</sup> X



- 16 16' 16n FINX

Les indicateurs intervenant dans ces formules sont explicités ci dessous .

- M : mise en route de la simulation .
- FINIT.G : Fin d'initialisation générale .
- FING+1 : Fin d'incrémentation générale .
- DIVG : Divergence générale ( trop de rebouclages ) .
- X : Nécessité de résoudre l'équation x à cet instant .  

$$X = \text{DELTA.AX} + \text{DELTA.BX} + \dots + \text{MINPAX.CONVERG}$$
 avec
  - + DELTA.AX : La variation de A impose une nouvelle résolution de x à cet instant .
  - + MINPAX : Le pas de temps  $\Delta t_x$  est le plus faible .
  - + CONVERG : La simulation a convergé à cet instant ( fin des rebouclages ) .
- 1X : Première résolution de x à cet instant de simulation .
- FINX+1 : Fin de l'incrémentation de x .
- FINX : Fin de la résolution x .
- DIVX : Divergence de la résolution x .  

$$\text{DIVX} = \text{NCNRX} + \text{NCPCX}$$
 avec
  - + NCNRX : Non convergence de l'algorithme de Newton Raphson lors de la résolution de x .
  - + NCPCX : Non convergence de la prédiction correction lors de la résolution de x .
- STOPX : Dépassement du nombre de pas ou des caractéristiques prédéfinies pour la résolution x .

#### 4. Grafcet gouvernant et Grafcets gouvernés .

Une étude plus approfondie des diverses actions montre que certaines d'entre elles ( x, init.x, x+1, init.G, G+1) se déroulent selon un enchainement séquentiel descriptible à l'aide d'un Grafcet séparé . Le Grafcet général gouverne ces nouveaux Grafcets en les activant dans leur première étape lorsque l'action associée est validée .

Une représentation de la simulation, sous forme d'un ensemble de

Grafjets gouvernant et gouvernés, nous sera très utile lors de l'étude de l'implantation du système sur un réseau multiprocesseur pour effectuer un certain nombre de calculs en parallèle.

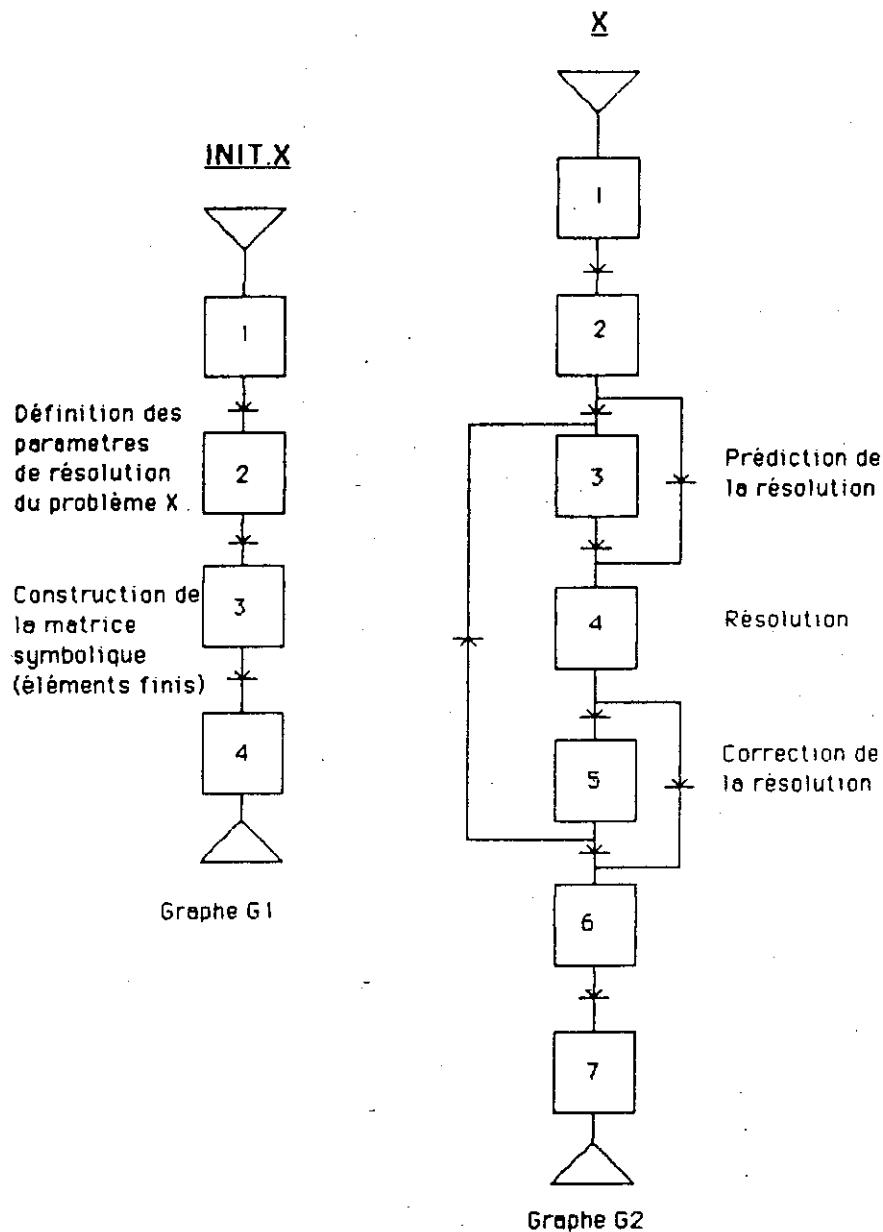


Figure 11.4 Grafjets gouvernés associés aux tâches d'initialisation et de résolution.

## 5. Le descripteur GRAFCET .

Le principe du moniteur Grafcet est basé sur la méthode de la photo dont le cycle d'exécution est représenté par le schéma de la figure II.5 .

- A chaque passage, la validité de tous les indicateurs utilisés dans les formules logiques est recalculée, puis chaque combinaison logique est réactualisée .

- Pour chaque transition, si la réceptivité associée est vraie, l'activation des étapes amont est testée de façon à valider ou non les indicateurs de transition valide .

- Le rafraîchissement des indicateurs d'étape se fait en trois temps .

- \* Pour chaque transition valide, les indicateurs images des étapes amont sont désactivés .

- \* Pour chaque transition valide, les indicateurs images des étapes aval sont activés .

- \* Les indicateurs images sont dupliquées dans les indicateurs d'étape .

- Pour chaque indicateur d'étape activée, la liste des actions associées est parcourue et les indicateurs d'action validés .

- Pour chaque indicateur d'action validée, la routine associée est appliquée .

- Retour à l'actualisation des indicateurs .

Dans le cas d'une résolution monoprocesseur, une seule routine peut être appelée à la fois et le cycle doit attendre la fin des tâches validées pour se boucler . Dans le cas où plusieurs actions devraient être lancées simultanément, un ordre de priorité devra être associé au lancement des routines associées .

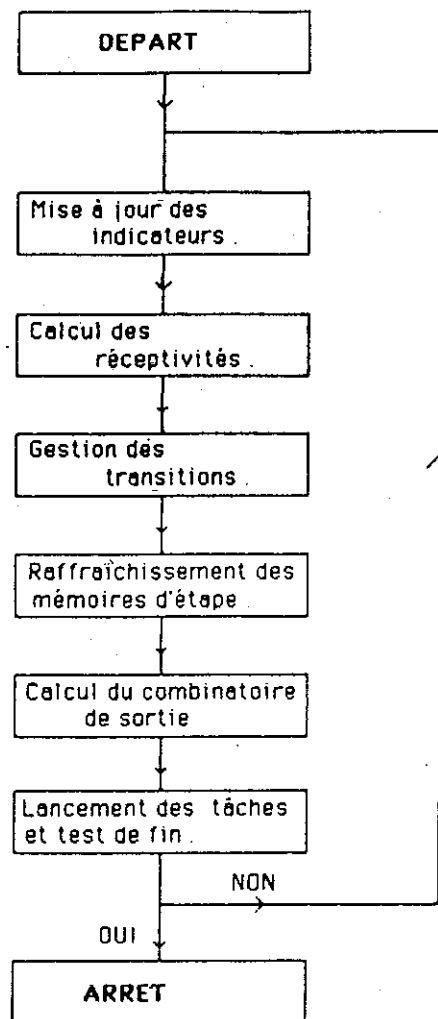


Figure II.5 Principe de fonctionnement du moniteur grafcet basé sur la méthode de la photo.

## 6. Visualisation du graphe.

Grace à cet automate, la simulation numérique de chacun des phénomènes couplés est autonome. L'opérateur peut suivre son déroulement sur l'écran où le grafcet gouvernant est reproduit en matérialisant les étapes valides. Les principaux indicateurs présents à gauche du graphe, et les actions visibles sur la droite de la console, informent l'utilisateur des raisons d'un arrêt de fonctionnement de la simulation et à tout moment visualise les actions en cours de traitement (figure II.6).

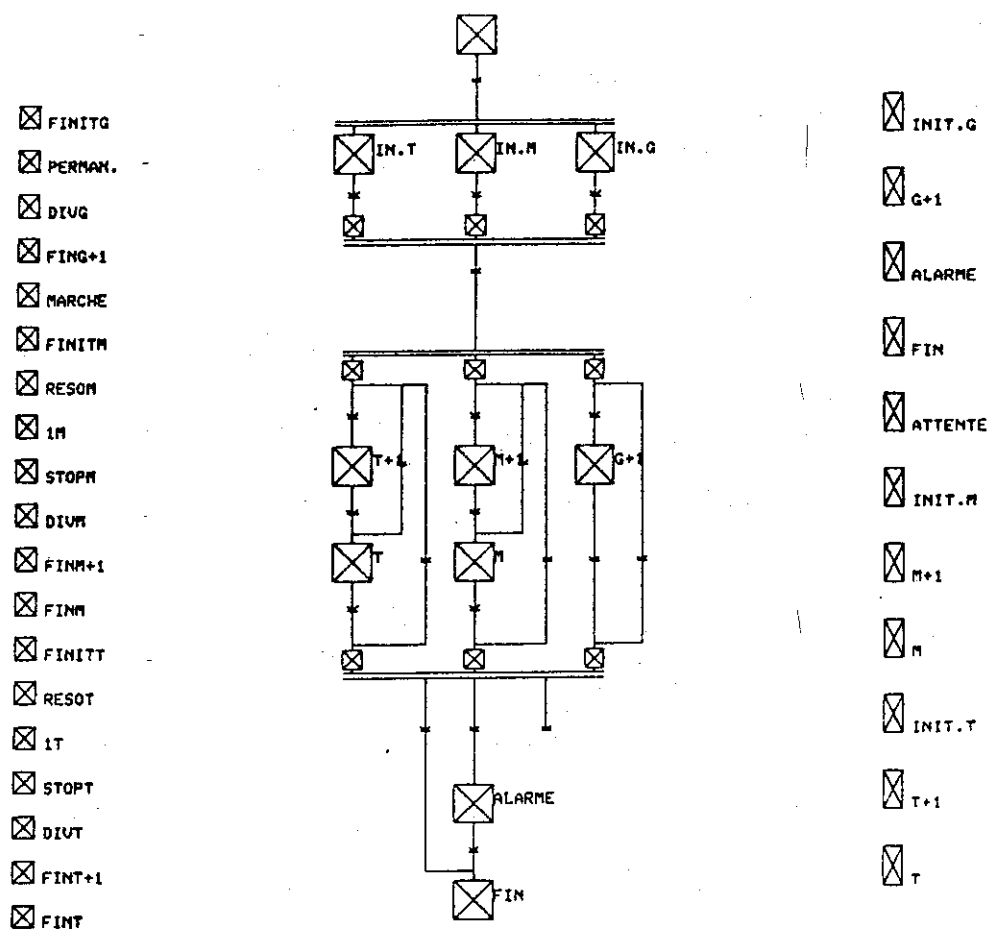


Figure II.6 Visualisation du grafcet sur l'écran de contrôle .

### II.A.3 - RESOLUTION MULTIPROCESSEURS

#### 1. Introduction .

Le paysage informatique évolue rapidement . Les gros systèmes multi-utilisateurs sont de plus en plus délaissés au profit de minisystèmes reliés en réseau et la contrainte de coût et de temps d'unité centrale a tendance à s'estomper derrière la contrainte du temps d'attente devant la console . De telles considérations nous ont conduits à nous interroger sur les avantages que peut procurer un réseau de minicalculateurs lors de la simulation de problèmes couplés .

L'étude menée dans le laboratoire sur la résolution des systèmes linéaires par une suite de groupe d'opérations effectuées simultanément [3] a déjà montré l'efficacité du parallélisme . Cette technique s'est avérée également performante dans l'utilisation du moniteur Grafcet pour piloter l'ensemble de la simulation d'un problème couplé en utilisant un noeud du réseau de calculateurs pour chaque phénomène physique . Une telle opération permet de diminuer sensiblement le temps d'attente en résolvant en parallèle les différents systèmes découplés aux pas de temps désignés par l'automate .

#### 2 . Architecture multiprocesseurs .

L'architecture multiprocesseurs comporte ( figure II.6 )

- un superviseur qui gère l'ensemble de la résolution au moyen du Grafcet gouvernant .
- des solveurs, un par phénomène physique couplé, qui s'occupe de la résolution et des actions spécifiques à chaque problème au moyen des Grafcets gouvernés .
- des boîtes aux lettres de communication permettant l'échange de messages entre le superviseur et les solveurs .
- une banque de données centrale accessible à partir du superviseur .

- des banques de données déportées, une par solveur, accessibles à partir du superviseur et du solveur associé.

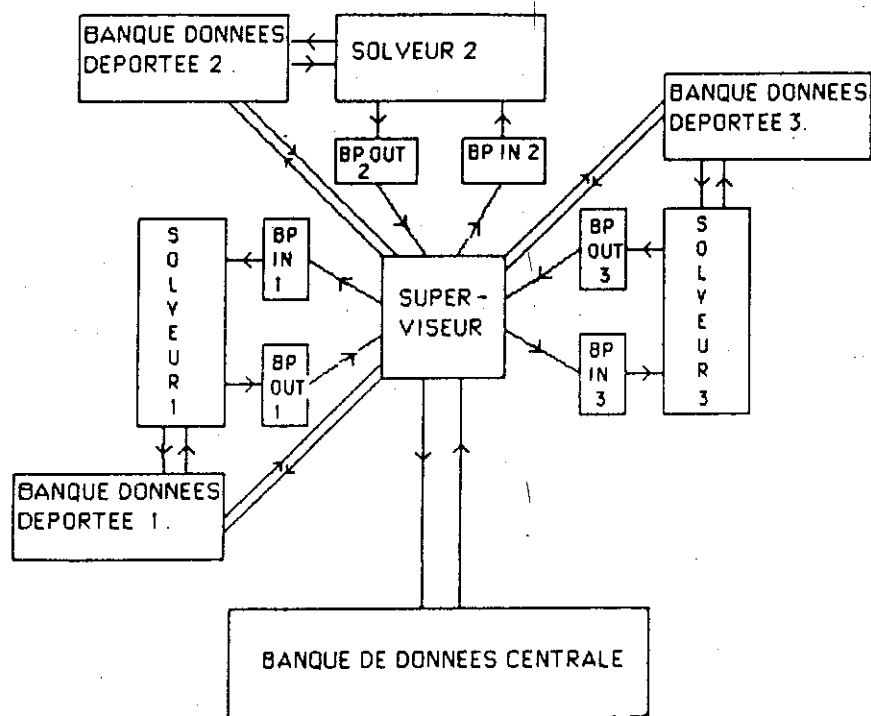


Figure II.6 Organisation fonctionnelle de la résolution multiprocesseurs.

### 3. Procédure d'échange d'informations.

Nous avons utilisé les techniques classiques mises en oeuvre par les systèmes de traitement d'informations parallèles.

Les informations échangées sont de deux natures .

a) Les messages . Ils permettent de gérer le Grafcet gouvernant et les Grafcets gouvernés . Leur transfert se fait du superviseur vers les solveurs, et vice versa, au moyen des boîtes aux lettres, fichiers associés à un solveur ( qui en possède deux ) . Dans la première boîte aux lettres, le superviseur écrit les informations que le solveur lit, dans la seconde le solveur écrit et le superviseur lit . Cette organisation rend impossible les transferts d'informations directement d'un solveur vers un autre pour conférer au superviseur le rôle de pilote de la simulation .

Pour gérer les conflits d'utilisation d'une boîte aux lettres, possible lorsque le superviseur et le solveur veulent ouvrir simultanément le fichier associé, l'algorithme suivant est utilisé .

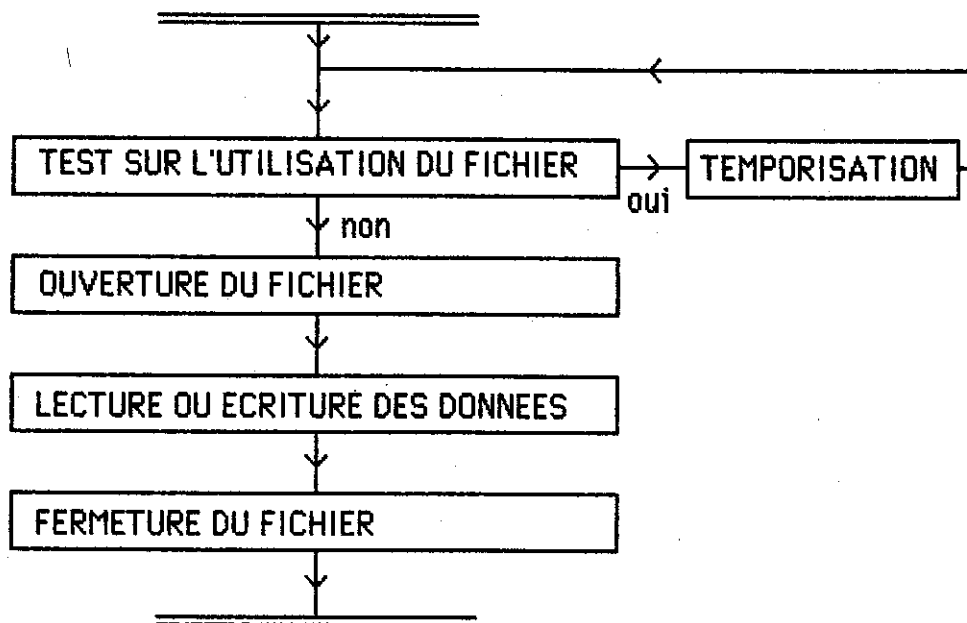


Figure II.7 Algorithme de dialogue par lecture d'un fichier tampon .

Enfin, pour s'assurer que les informations à acquérir ont bien été renouvelées depuis la dernière lecture et que les informations à transmettre ne recouvriront pas les anciennes avant que l'interlocuteur n'ait pu les recevoir, un codage simple a été adopté .



Après chaque lecture, le fichier boîte aux lettres est totalement écrasé . Un simple test permet alors à la fonction qui écrit, de savoir si ses dernières informations ont été lues et à la fonction qui lit de savoir si les informations ont été renouvelées .

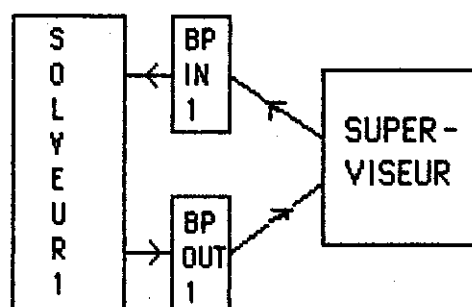


Figure II. 8 Echange d'ordres et de comptes rendus d'exécution à travers les fichiers boîtes aux lettres .

b ) Les données . Elles doivent être dupliquées de la banque centrale vers les banques de données déportées pour permettre la résolution des problèmes correspondants à partir des valeurs des autres variables d'état . Une duplication en sens contraire doit également être organisée pour centraliser les résultats, les transférer vers d'autres banques déportées et les exploiter .

Chaque banque est créée sous forme d'un fichier accessible du superviseur et du solveur associé . Dans les deux cas, l'accès est donné en lecture et en écriture .

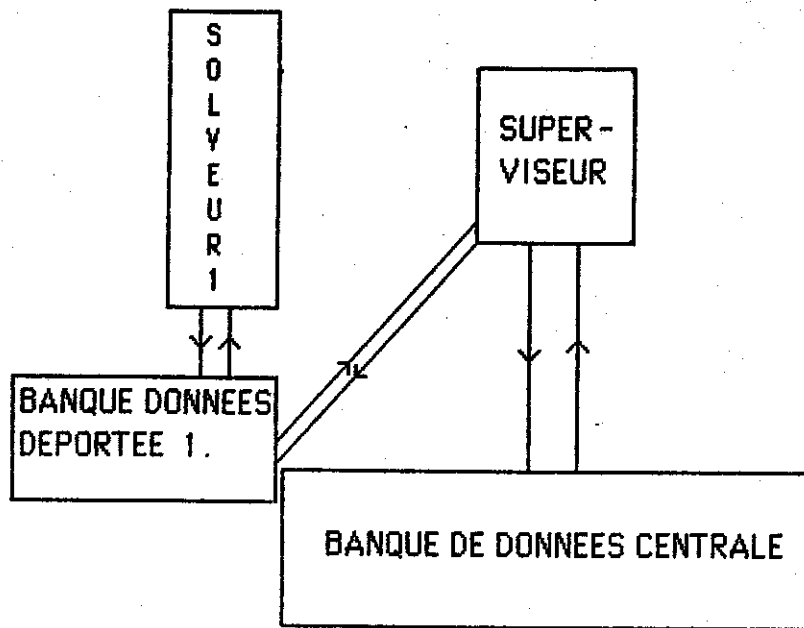


Figure II.9 Echange de données entre les banques .

#### 4. Description du fonctionnement de la simulation multiprocesseurs .

Lors d'une simulation multiprocesseurs, l'ensemble du travail de résolution est effectué par les solveurs tandis que le superviseur gère le seul déroulement de la séquence grâce au moniteur Grafcet défini précédemment . Cette organisation en travail déporté impose de modifier certaines actions associées aux étapes du graphe gouvernant et des graphes gouvernés sans pour cela modifier leur structure .

Le solveur est un programme de résolution des équations aux dérivées partielles pouvant fonctionner sous deux modes -initialisation-résolution- selon la valeur des indicateurs présents dans le fichier boîte aux lettres d'entrée . La gestion du déroulement de la séquence de fonctionnement est représentée par le graphe gouvernant solveur de la figure II.10 . Les actions associées aux graphes G1(initialisation) et G2(résolution) ont subi quelques modifications pour tenir compte :

- de la nécessité de transférer les banques de données du problème du superviseur vers le solveur lors de l'initialisation, afin de configurer ce dernier ;

- de la nécessité de transférer les valeurs des variables d'état et les paramètres de couplage du superviseur vers le solveur avant la résolution, puis de transférer les résultats du solveur vers le superviseur après la

résolution pour que celui ci puisse mettre à jour la banque de données générale et gérer la simulation.

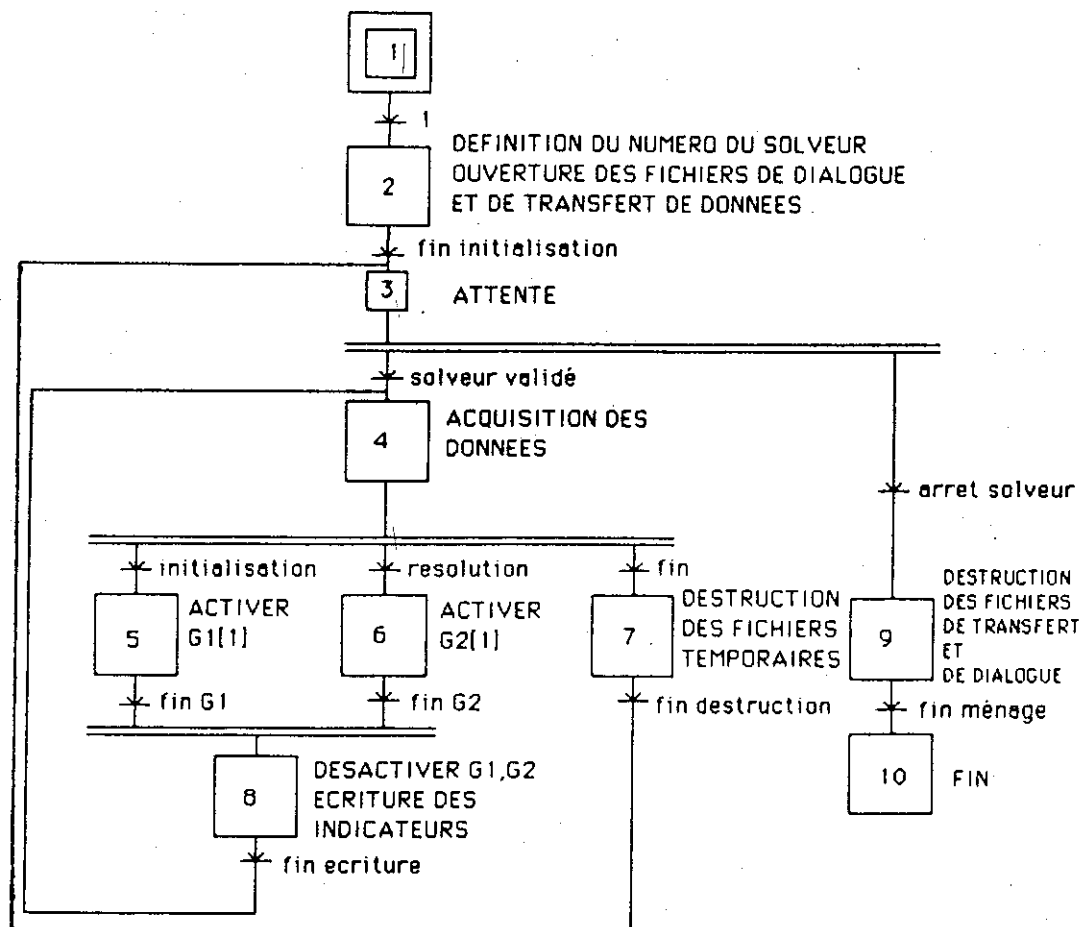


Figure II. 10 Grafcet gouvernant solveur.

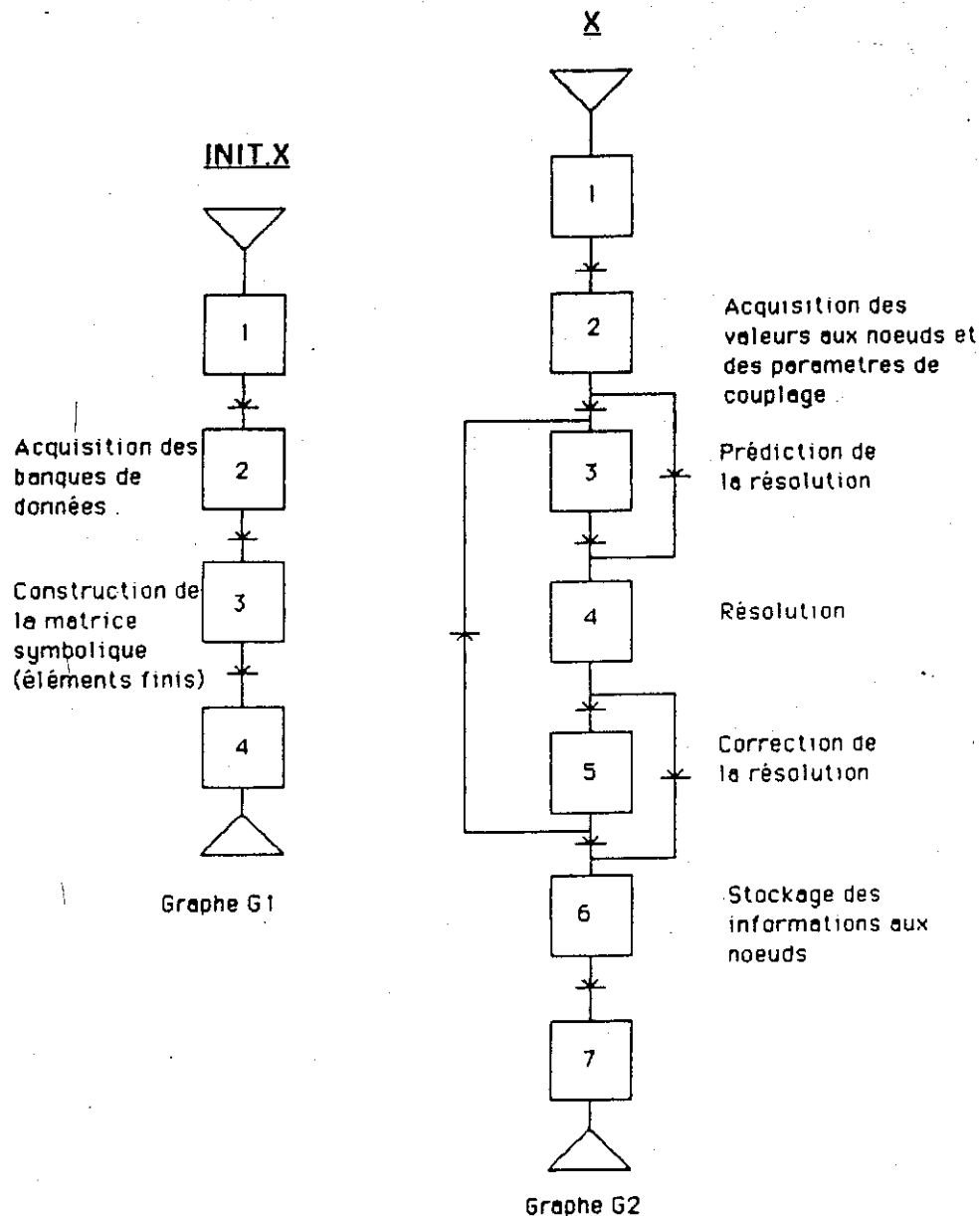


Figure II.11 Graphes gouvernés solveur.

Pour organiser ces échanges de données et déporter les tâches de résolution, les actions associées à certaines étapes du grafset superviseur ont été également modifiées comme le montre la figure II.12.

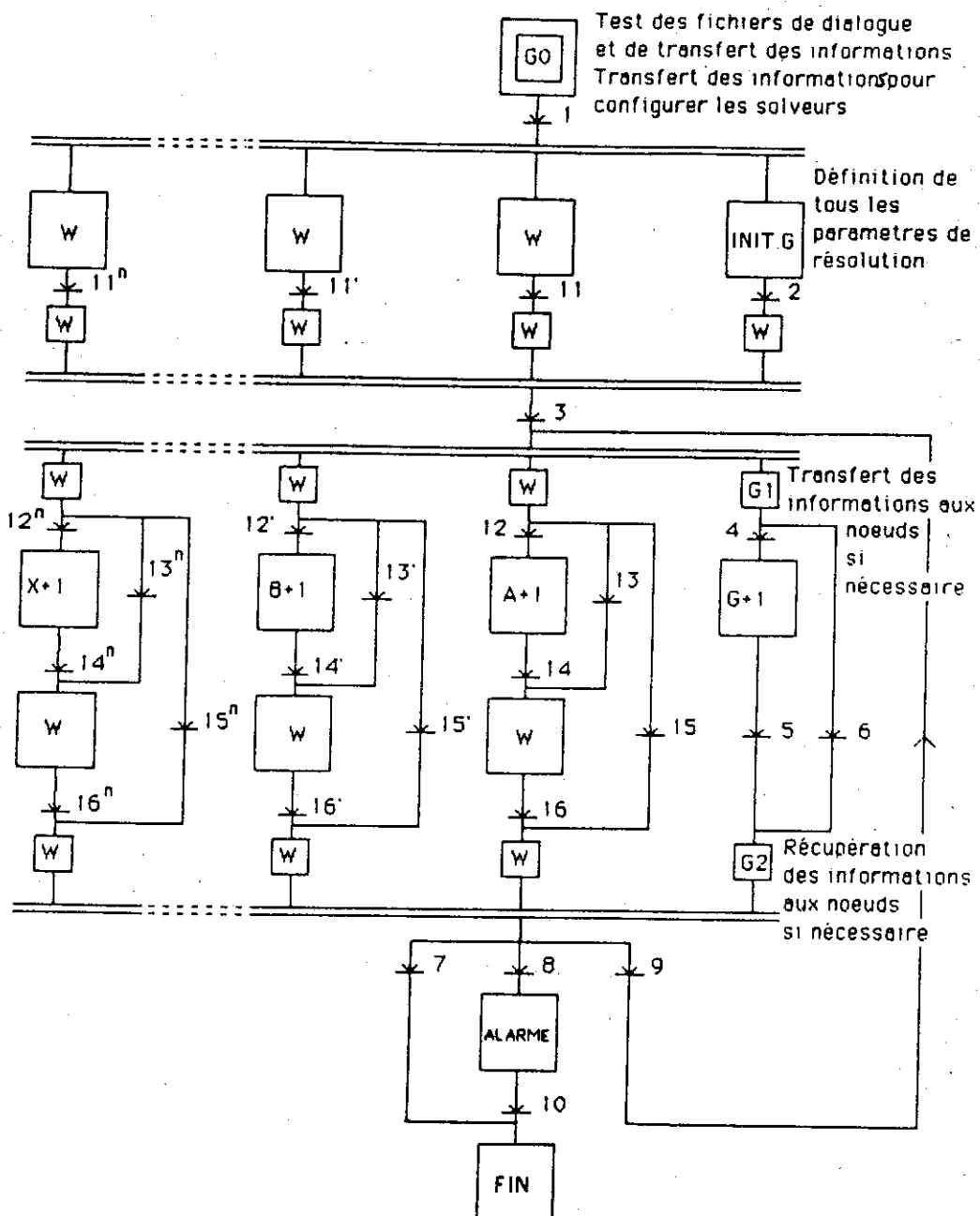


Figure II.12 Grafset superviseur modifié pour une résolution multiprocesseurs.

## 5 . Performances comparées des résolutions mono et multi processeurs .

Le temps nous a manqué pour tester, dans le détail, les performances des systèmes mono et multiprocesseurs et pour faire une étude comparative digne de ce nom . Aussi, nous n'indiquerons que les tendances et les limites que nous avons ressenties .

Si les stratégies de résolution employées dans les deux cas ( cf 11.2 ) sont identiques, la lourdeur apportée par le transfert des données compense le gain de temps fourni par les rares résolutions en parallèle .

Par contre, si la stratégie de résolution tient compte d'une possibilité de parallélisme ( cf 11.4 ), les gains de temps sont beaucoup plus appréciables .

Il va de soi qu'une optimisation des transferts de données ne pourra qu'améliorer les performances des résolutions multiprocesseurs qui, selon nous, représente la solution d'avenir pour la simulation de problèmes couplés .

## II.4 - PREDICTION CORRECTION CROISEE

### 1. Introduction .

Le but que nous avons poursuivi en élaborant le moniteur Grafcet était de rendre la simulation d'un problème couplé totalement automatique tout en optimisant les temps de résolution . Pour ce faire, nous avons eu recours à une stratégie mettant en oeuvre un certain nombre d'indicateurs . Parmi ceux-ci, les indicateurs  $\Delta xy$  ont une importance toute particulière puisqu'en imposant, après une résolution d'une variable d'état, la résolution d'une autre variable d'état, ils conditionnent à la fois la précision, la stabilité mais aussi le coût de la simulation . Or, il est facile de montrer sur un exemple que la définition de ces indicateurs sous forme d'une comparaison d'une variation d'une variable d'état à un seuil ne représente pas un choix optimum . Considérons pour cela, un problème couplé magnétothermique et trois instants de la simulation .

\* Avant le passage du point de Curie, le système magnétique évolue peu . L'actualisation magnétique ne sera donc nécessaire que pour des variations thermiques importantes .

\* Pendant le passage du point de Curie, la perméabilité magnétique du matériau décroît rapidement avec la température, ce qui entraîne une diminution sensible de la densité de puissance thermique . De ce fait, il est nécessaire d'actualiser la résolution magnétique pour de faibles variations de la température .

\* Après le passage du point de Curie, le matériau se comporte magnétiquement comme de l'air . La résolution magnétique ne dépend pratiquement plus de la température .

Si nous voulons une bonne précision de la simulation, le deuxième cas impose le choix d'un seuil faible, de l'ordre de quelques degrés, qui alourdit considérablement les temps de calcul des phases 1 et 3 . C'est pourquoi nous avons étudié une solution à ce problème consistant, dans un premier temps, à transférer ces tests sur les propriétés physiques puis, dans un second temps, à les supprimer en élaborant un algorithme de prédiction correction croisée .

## 2. Test de couplage sur les propriétés physiques.

Le couplage des équations représentant les divers phénomènes physiques en présence se fait à travers la dépendance de propriétés physiques envers une ou plusieurs variables d'état qui n'interviennent pas directement dans l'équation où elles sont définies ( $\nu(T)$ ,  $\sigma(T)$ ). De ce fait, une variation d'une variable d'état, par exemple  $T$ , n'aura de répercussion sur le comportement d'une autre variable d'état ( $A$ ), que si les valeurs des propriétés physiques ( $\nu$ ,  $\sigma$ ) intervenant dans le modèle de calcul de cette dernière, sont influencées par cette variation ( $\Delta T$ ).

Cette constatation nous permet de remplacer le test  $\Delta TM$  par un test sur toutes les propriétés physiques. Cependant, cette organisation, si elle supprime un grand nombre de calculs inutiles, impose un certain nombre de seuils dont le choix sera toujours difficile. D'autre part, que le test se fasse sur les variables d'état ou sur les propriétés physiques, la détermination des seuils prive la stratégie de résolution d'un caractère universel qui nous paraît important. C'est pourquoi, nous avons tenté d'étendre l'algorithme de prédiction correction aux phénomènes physiques couplés dans le but de supprimer ces indicateurs  $\Delta XY$ .

## 3. Algorithme de prédiction correction croisée.

Il ne s'agit pas ici d'élaborer un nouvel algorithme de prédiction correction pour les problèmes couplés mais d'adapter la méthode exposée au II.A.1 à ce cas. Pour ce faire, nous avons différencié les résolutions effectuées sur un ordinateur monoprocesseur des résolutions parallèles effectuées sur un réseau de calculateurs.

### - Cas d'une résolution multiprocesseurs.

La possibilité de résoudre en parallèle les divers systèmes d'équations permet d'adopter une stratégie très simple. Tous les phénomènes physiques sont calculés en parallèle à chaque pas de la simulation. Le test de correction est effectué sur chaque phénomène et le plus petit pas de temps est choisi pour le prochain pas ou pour un nouveau calcul de ce pas si cela se révèle nécessaire. La durée de la simulation correspond alors à la résolution du système le plus sensible à chaque pas de temps. Cette méthode a été testée sur un problème magnéto-thermique et a donné



entière satisfaction .

- Cas d'une résolution monoprocesseur .

Dans ce cas la stratégie précédente ne peut plus être appliquée car elle conduirait à des temps de calculs trop importants . Nous avons adopté la solution consistant à choisir comme prochaine équation à résoudre celle dont le pas de temps est le plus faible . Dans le cas d'une correction, toutes les résolutions postérieures au nouvel instant de calcul sont détruites . Cette méthode a été testée dans le cas d'un problème magnétothermique couplé et s'est révélée performante . Cependant, étant donné la valeur respective des pas de temps, il se peut qu'une correction sur un phénomène impose de détruire un grand nombre de résolutions des autres phénomènes, ce qui alourdit considérablement le coût de la simulation .

Nous avons soulevé par ce travail un ensemble de problèmes délicats, et les quelques solutions proposées laissent encore une grande place à une recherche future qui peut déboucher sur l'obtention d'algorithmes optimisés et autonomes, améliorant considérablement les temps de réponse des logiciels de simulation de phénomènes couplés .

## II.5 - DESCRIPTION FORMELLE DES PROPRIETES PHYSIQUES.

### 1. Introduction.

Que ce soit pour décrire des propriétés physiques dépendantes du temps ou des propriétés physiques dépendantes de plusieurs variables d'état, les banques de matériaux actuelles, de par leur structure, se révèlent souvent inadéquates. Le but de la paramétrisation de cette banque est de permettre la description totalement interactive de ces types de propriétés physiques.

### 2. Structure de la banque de matériaux paramétrée.

La banque de matériaux paramétrée est organisée en deux niveaux (figure II.13). Les paramètres physiques sont définis à partir de banques de courbes, de modèles mathématiques ou d'une tabulation de la valeur aux noeuds du maillage. Les variables physiques sont définies formellement à partir de cette banque de paramètres physiques, mais aussi à partir de la banque des variables d'état.

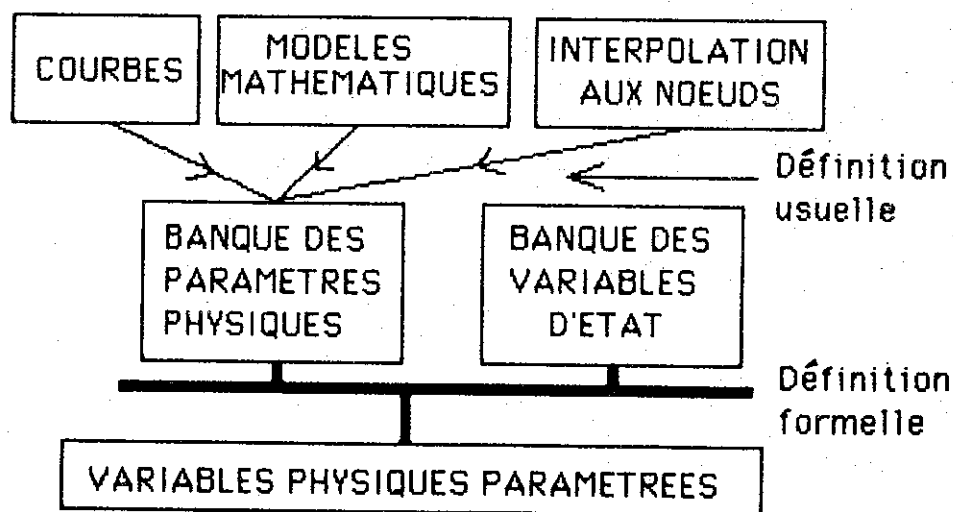


Figure II.13 Structure de la banque des propriétés physiques.

## a) Banque des paramètres physiques .

Un paramètre physique est une grandeur définie interactivement par :

- un nom et un commentaire .
- une provenance : courbe, modèle mathématique, interpolation d'une valeur aux noeuds du maillage .
- un type : valeur directe ou dérivée .
- des paramètres de définition dépendants de la provenance .
  - \* courbe : type et coefficients d'interpolation (spline, moindres carrés)
  - \* modèle : coefficients de définition de la fonction mathématique associée .
  - \* interpolation : valeurs de la grandeur aux noeuds .
- une variable de dépendance qui peut être soit une coordonnée (  $x, y$  ), soit le temps (  $t$  ), soit une variable d'état (  $A, H, T$  ) ou une de ses dérivées (  $B, \dots$  ) .

Un tel mode de description permet d'obtenir des grandeurs évolutives dans le temps ou dans l'espace, ou dépendantes d'une variable d'état . Leur combinaison à l'intérieur d'une formule mathématique donne naissance à une variable physique qui peut à la fois évoluer dans le temps et l'espace et dépendre de plusieurs variables d'état ou de leurs dérivées .

## b) Banque des variables physiques .

Une variable physique est l'application d'une formule dépendant des paramètres physiques, mais également des variables d'état, sur une région du domaine d'étude pour laquelle cette fonction est définie d'une façon unique . Elle est stockée sous sa forme formelle dans la banque des variables physiques [15] .

L'expérience acquise au laboratoire dans le domaine de la description formelle a débouché sur un système de gestion utilisé pour la définition des coordonnées des points du domaine d'étude à partir de paramètres géométriques et pour définir les variables d'exploitation .

L'organisation modulaire de ce système nous a grandement facilité le travail puisque, pour construire notre nouvelle banque de propriétés physiques, il nous a suffi de compléter la structure existante pour bénéficier de la gestion de la banque des formules préalablement réalisée .

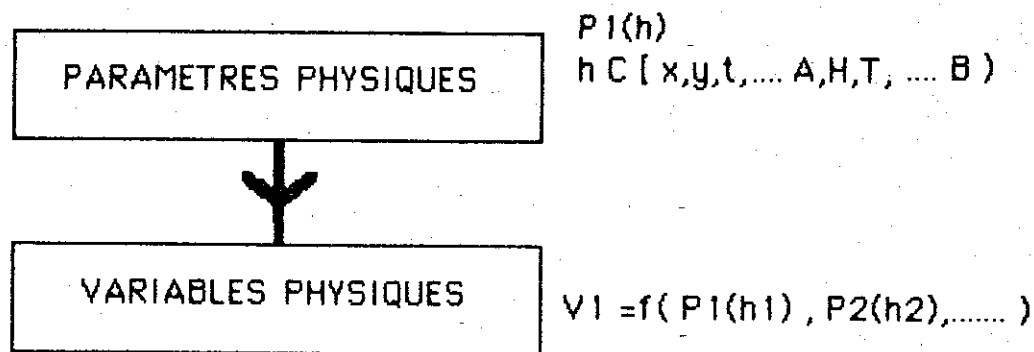


Figure II.14 Les deux niveaux de description de la banque.

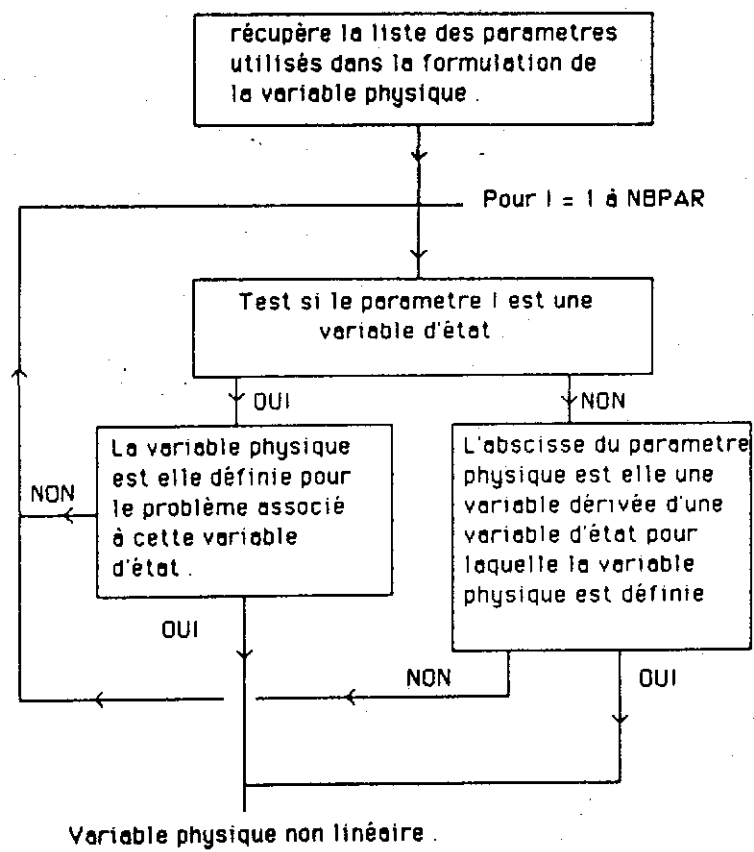


Figure II.15 Algorithme de test de la non linéarité d'une variable physique.

### 3. Prise en compte des propriétés physiques non linéaires .

L'utilisation de la méthode de Newton Raphson nécessite pour élaborer la matrice jacobienne, de dériver les propriétés physiques non-linéaires par rapport à une variable d'état ou à une variable dérivée d'une variable d'état (  $dv/dB^2$ ,  $dCp/dT$ , ..... ). Dans le cas d'une définition formelle, une analyse doit être faite pour reconnaître les variables physiques dépendantes des variables d'état . Elle est effectuée selon l'algorithme de la figure II.15 .

### 4. Quelques exemples d'application spécifiques au chauffage par induction de cette nouvelle banque de matériaux .

#### a) Modélisation du chauffage d'une pièce en mouvement .

Une des difficultés de la modélisation des phénomènes magnéto-thermiques couplés que nous avons rencontrées au chapitre I, était la prise en compte des pièces en mouvement: cas d'un défilement de billettes dans un inducteur pendant une opération de chauffage avant forgeage par exemple . La solution proposée était de substituer au mouvement de la pièce, une source dépendant du temps, en se plaçant, non plus dans le référentiel lié à l'installation de chauffage, mais dans celui de la pièce à chauffer . Une telle opération n'est guère possible sur les systèmes conventionnels car elle nécessiterait la redéfinition des régions sources de courant à chaque pas de temps . La possibilité de définir une fonction courant dépendante du temps résoud ce problème dans un grand nombre de cas .

L'utilisateur décrit une vaste région dans laquelle va défiler l'inducteur puis affecte à cette région une densité de courant paramétrée comme suit :

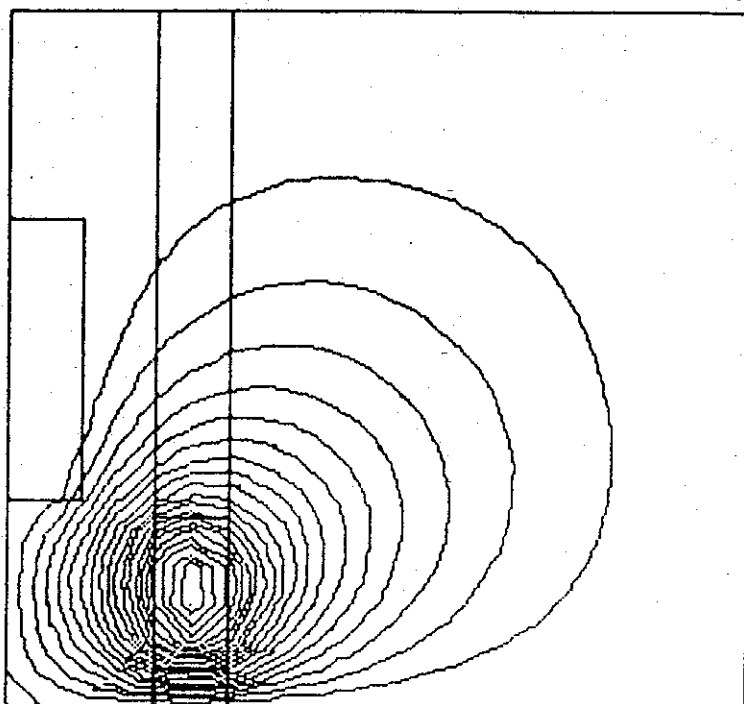
$$J=J_0 \cdot \text{DEP1}(x,y,t)$$

où

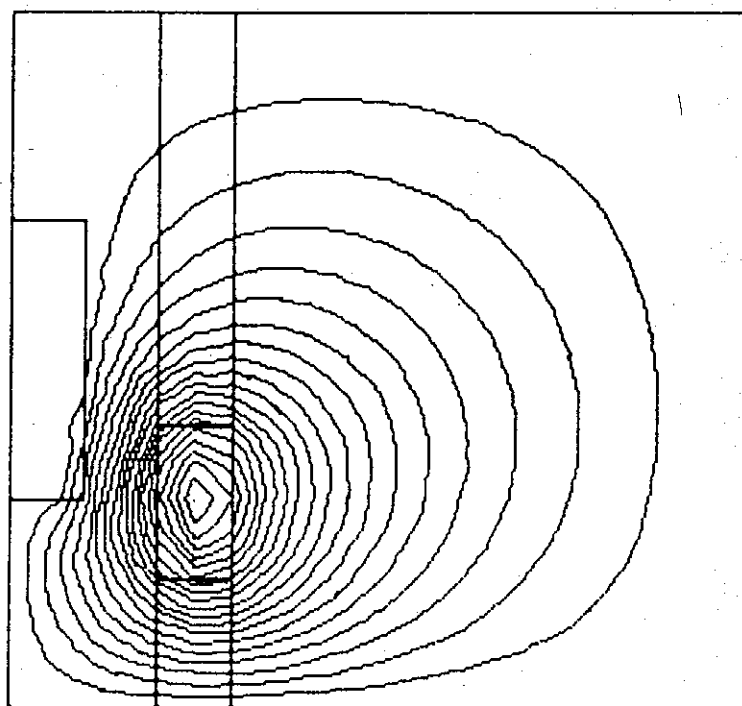
$J_0$  : est la valeur de la densité de courant .

$\text{DEP1}$  : est un paramètre défini à l'aide d'une fonction mathématique  $\text{DEPREC}$  représentant le déplacement d'un rectangle dans le domaine d'étude tel que  $\text{DEPREC}(x,y,t) = 1$  si à l'instant  $t$  le point  $M$  de coordonnées  $x$  et  $y$  se trouve à l'intérieur du rectangle .

$\text{DEPREC}(x,y,t) = 0$  dans le cas contraire .



Module du potentiel vecteur à  $t=3s$



Module du potentiel vecteur à  $t=6s$

Figure II.16 Visualisation à plusieurs instants de la simulation des équipotentielles du module du potentiel vecteur A et de la restriction de la région source de courant au domaine où celle ci est non nulle .

b) Simulation de l'influence d'une modification de position de l'inducteur dans une opération de traitement thermique .

Lors du traitement d'une série de pièces, une cadence de production élevée et les contraintes mécaniques en présence peuvent occasionner une variation du positionnement relatif de l'inducteur par rapport à la charge au cours de l'opération. Une paramétrisation de la source de courant en fonction du temps permet de calculer directement la courbe de variation de grandeurs électriques globales ou ponctuelles en fonction de la valeur de l'écartement de l'inducteur par rapport à sa position nominale .

Note : ces courbes pourront être d'une très grande utilité aux automaticiens chargés de réguler les installations de chauffage par induction .

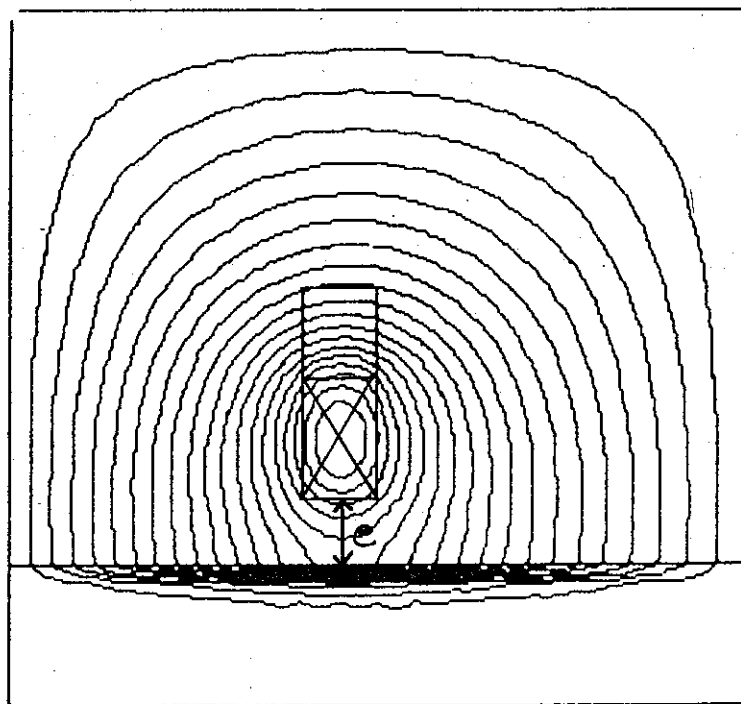


Figure II.17 Visualisation du domaine d'étude et de la paramétrisation de la densité de courant

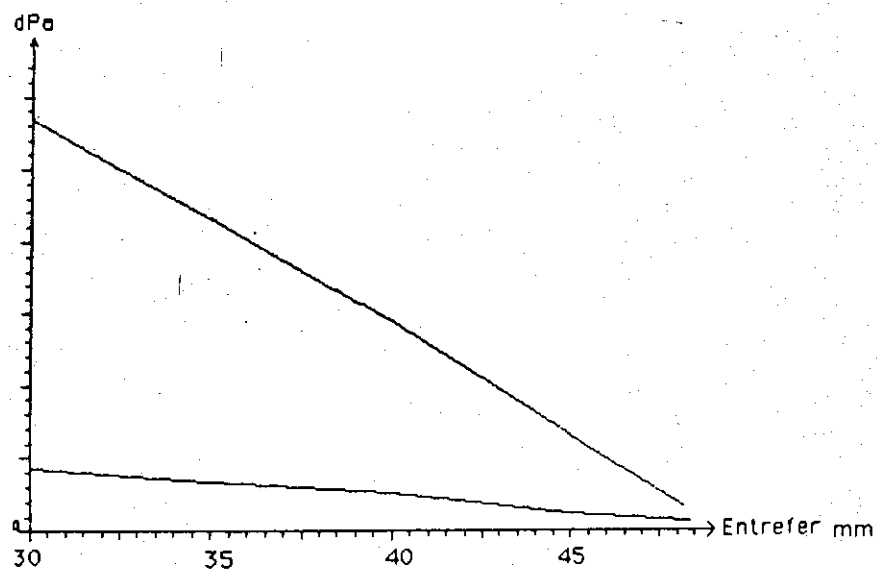


Figure II.18 Evolution de la densité de puissance active en un point, en fonction de la valeur de l'entrefer  $\langle e \rangle$ .



## II.6 - ARCHITECTURE DU LOGICIEL

### 1. Introduction .

Une première étude sur la C.A.O. en chauffage par induction avait permis de développer, au sein du laboratoire, le logiciel FLUX-THERM, extension du logiciel FLUX aux problèmes couplés magnétothermiques . Un des enseignements que nous avons retenus de cette expérience était la fragilisation du système obtenu en ajoutant des banques de couplage à un logiciel qui, s'il était d'un haut degré de fiabilité dans le domaine magnétique, n'avait pas été conçu dans le but de résoudre des problèmes couplés . Aussi, lors de la poursuite de cette étude pour le compte de la société CELES, il nous a semblé impératif de reconsidérer l'ensemble du problème et de définir pour ce nouveau système, une structure orientée vers la résolution de problèmes couplés .

Cette étude préalable nous a conduits à choisir entre deux possibilités

- un système générateur ( FLUX-EXPERT)
- un système à bibliothèques (FLUXLAB)

toutes deux disponibles au laboratoire, dans le cas d'une simulation numérique par la méthode des éléments finis qui, compte tenu du savoir accumulé depuis de nombreuses années, nous a paru la solution optimale pour un logiciel non spécialisé .

Des contraintes de disponibilité des systèmes et de taille mémoire nécessaire pour les faire fonctionner, nous ont conduit à choisir le système à bibliothèques FLUXLAB, utilisé parallèlement par d'autres chercheurs du laboratoire pour des applications aussi diverses que l'étude de la sensibilité d'une résolution à un paramètre, l'optimisation d'un transformateur, la simulation de la vibration des machines électriques ou la modélisation de l'arc électrique .

### 2 . Structure du logiciel FLUXLAB

Les bibliothèques du logiciel FLUXLAB peuvent être rangées en deux grandes classes ( figure II.19 ) .

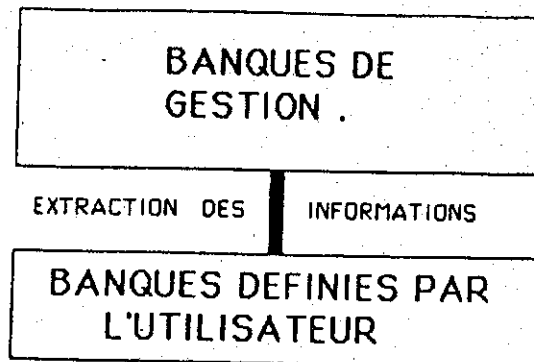


Figure II.19 Classification des bibliothèques du logiciel FLUXLAB .

- Les banques utilisateur permettant de décrire les différents problèmes (magnétique, thermique, mécanique .... ) et les banques spécifiques à chaque problème ( échanges thermiques radiatifs, .... ) constituent "la base configuration" .

- Les banques d'extraction de données de la classe précédente et les banques de gestion et de description constituent la base "solveur éléments finis", commune à tous les problèmes .

Grace à cette organisation, la description d'un nouveau problème se trouve facilitée car l'utilisateur dispose de tables qu'il lui suffit de mettre à jour pour définir

- Le nombre et le nom des problèmes .
- Le nom des variables d'état et pour chaque problème leur utilisation éventuelle ( une seule par problème ), leur type ( réel ou complexe ) et leur nombre de composantes .
- Le nom des variables physiques et pour chaque problème leur utilisation éventuelle, leur type ( réel ou complexe ) et leur nombre de composantes .
- Le type de la résolution ( pas à pas ou non )

Par contre ne disposant pas de générateur, ce système nécessite la programmation d'une routine d'intégration spécifique pour chaque problème. Ces programmes sont placés dans une banque et adressés automatiquement en fonction du problème enregistré pour la résolution .

### 3. Outils généraux .

Les structures de données utilisées de manière classique sont des tableaux de réels, d'entiers et de chaînes de caractères, des listes d'entiers et de chaînes de caractères de longueur variable et des piles d'entiers . Des outils généraux permettent de manipuler et de contrôler ces structures . Parmi ceux-ci, citons les programmes d'initialisation de tables et de listes, d'enregistrement et d'élimination de données d'une liste ou d'une table, de contrôle de la validité des données qui sont enregistrées ou lues et des dépassements de tables .

### 4. Gestion des données .

Les données du système FLUXLAB sont réparties en différentes banques.

- Banque des formules
- Banque des points
- Banque des lignes
- Banque des triangles
- Banque des éléments
- Banque des surfaces
- Banque des régions
- Banque des noeuds
- Banque des variables physiques

Le système de gestion de chaque banque réalise les opérations courantes de création, destruction, consultation, modification et enregistrement . Cela se traduit par un ensemble de sous-programmes travaillant tous sur les mêmes données et ayant chacun une tâche spécialisée .

### 5. Outils de communication homme-machine .

Le processus de conception d'une installation n'est pas une suite de tâches séquentielles réalisées dans un ordre bien défini a priori . Aussi la gestion des différentes parties du système doit être suffisamment souple pour permettre à l'utilisateur de passer aisément de la description d'une entité ( point, ligne, ... ) à la description d'une autre entité ou à la résolution puis à l'exploitation et de nouveau à la description pour modifier un paramètre de manière à optimiser une caractéristique de l'installation . Pour ce type d'application un langage de commande s'est donc avéré nécessaire . D'autre part, l'expérience a montré que la définition de certaines banques (ligne, frontières, régions .. ) était grandement facilitée par une désignation graphique des entités et des commandes .

C'est pourquoi, un logiciel de gestion de dialogues interactifs couplé à un logiciel de gestion d'écran est utilisé . Ces deux logiciels, BIB-DIALOG et BIB-DIAGRA ont tout deux été développés au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble . L'emploi de ces deux bibliothèques apporte une séparation complète entre le matériel graphique utilisé et les logiciels développés a l'aide de celles ci . De ce fait, une compatibilité avec les terminaux graphiques les plus performants est assurée .

## 6 . Exploitation des résultats sous forme de courbes .

L'expérience nous a montré que la visualisation de l'évolution d'une grandeur entre deux points du domaine d'étude ou de l'évolution d'une grandeur dans le temps était beaucoup plus facile à interpréter que la lecture d'un tableau contenant ces informations. C'est pourquoi l'utilisation d'une bibliothèque de tracé de courbes s'est révélée nécessaire. Ce logiciel nommé BIB-DIACOU a été développé au laboratoire . Il permet de travailler interactivement sur le tableau de résultats de manière à tracer l'évolution d'une ou de plusieurs grandeurs en fonction d'une autre, de superposer plusieurs tracés, d'agrandir une partie du tracé, etc... .

## II.7 - MACRO-ELEMENT POUR LA DESCRIPTION DES CONDITIONS AUX LIMITES DANS LE CAS D'ECHANGES RADIATIFS MULTIREFLEXION.

### 1. Définition du problème .

Les transferts de chaleur par rayonnement constituent un mode de chauffage important pour des traitements spéciaux (sémentation, nitruration, chauffage par susceptible ). Dès lors que certaines pièces peuvent rayonner l'une vers l'autre, l'hypothèse d'un rayonnement sur l'ambiante doit être abandonnée au profit d'une méthode permettant de calculer les échanges radiatifs existants réellement .

Dans ce qui suit, nous appellerons transfert par rayonnement, l'ensemble des échanges d'énergie thermique entre deux corps séparés par de l'air ou du vide . Du fait de l'état de surface imparfait des objets considérés, l'hypothèse d'une réflexion diffuse sera retenue et seuls les corps gris, opaques et diffusants pour lesquels les propriétés radiatives sont des caractéristiques intrinsèques du matériau, indépendantes de la longueur d'onde, pourront être pris en considération [21].

### 2. Equations des échanges radiatifs .

Pour decrire le système d'équations caractérisant les échanges radiatifs, il nous faut tout d'abord définir certaines grandeurs .

- $\epsilon$  , émissivité : caractérise le pouvoir rayonnant du corps par rapport à celui d'un corps noir (  $\epsilon = 1$  ) .
- $M$  , émittance : puissance émise par unité de surface de la source .  $M = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$
- $E$  , éclairement : flux incident par unité de surface .
- $J$  , radiosité : flux total émis par la surface .  
 $J = M + (1 - \epsilon) E$
- $\emptyset$  , flux net perdu : bilan énergétique sur la surface .  
 $\emptyset = J - E$  .
- $F_{1,2}$  , facteur de forme : fraction du flux total émis par la surface  $S_1$  qui atteint  $S_2$  .  $F_{1,2} \cdot S_1 = F_{2,1} \cdot S_2$

Soit une enceinte close remplie d'air ou de vide et divisée en  $N$  surfaces isothermes et à éclairement uniforme . Pour une surface  $S_i$ , l'éclairement  $E$  est la somme des radiosités des surfaces en regard .

$$* \quad E_i \cdot S_i = \sum_{j=1, N} S_j \cdot F_{i,j} \cdot J_j \quad (1)$$

La définition du facteur de forme permet de reformuler cette équation .

$$* \quad E_i \cdot S_i = \sum_{j=1,N} S_i \cdot F_{j,i} \cdot J_j \quad (2)$$

ou

$$* \quad E_i = \sum_{j=1,N} F_{j,i} \cdot J_j \quad (3)$$

La formulation de la radiosité et du flux perdu à partir de l'éclairement et de la température , permet d'obtenir deux systèmes d'équations .

$$[ \quad * \quad J_i = T_i^4 + (1 - \epsilon_i) \cdot \sum_{j=1,N} F_{j,i} \cdot J_j \quad (4)$$

$$[ \quad * \quad \emptyset_i = J_i - \sum_{j=1,N} F_{j,i} \cdot J_j \quad (5)$$

$$[ \quad * \quad \epsilon_i J_i = \epsilon_i T_i^4 + (1 - \epsilon_i) \cdot (J_i - \emptyset_i) \quad (6)$$

$$[ \quad * \quad \emptyset_i = \sum_{j=1,N} (\delta_{j,i} - F_{j,i}) \cdot J_j \quad (7)$$

avec

$$\delta_{j,i} = 1 \text{ si } i = j$$

$$\delta_{j,i} = 0 \text{ si } i \neq j$$

$$[ \quad * \quad \sum_{j=1,N} (\delta_{j,i} - (1 - \epsilon_i) \cdot F_{j,i}) \cdot J_j = \epsilon_i T_i^4 \quad (8)$$

$$[ \quad * \quad \emptyset_i = \sum_{j=1,N} (\delta_{j,i} - F_{j,i}) \cdot J_j$$

Nous obtenons deux systèmes matriciels permettant d'évaluer sur chaque surface  $S_i$  la valeur du flux net perdu  $\emptyset_i$  en fonction des températures .

$$* \quad [A] \cdot [J] = \epsilon \sigma \cdot [T_i^4] \quad (9)$$

$$* \quad [B] \cdot [J] = [\emptyset] \quad (10)$$

La matrice A dépend des émissivités des surfaces et de la géométrie, la matrice B ne dépend que de la géométrie. Evaluer les valeurs  $\Phi_i$  nécessite la résolution du système ( 9 ), puis la multiplication du vecteur solution par la matrice B. Selon le type de simulation effectuée, évolutive ou non, et si les valeurs des émissivités sont indépendantes de la température, il pourra être avantageux d'inverser la matrice A une fois pour toute puis, à chaque pas de temps de multiplier [ B ] par [ A<sup>-1</sup> ], plutôt que résoudre le système ( 9 ).

### 3. Utilisation d'un macro-élément radiatif.

#### a) Principe de la méthode.

La prise en compte du flux radiatif par les méthodes numériques du type éléments finis ou différences finies, n'est possible sans aménagement que dans le cas d'un rayonnement sur l'ambiante.

En effet, si le terme

$$\int h \cdot dT/dn_{\text{radiatif}} = \int \epsilon \sigma \cdot (T^4 - T_a^4)$$

avec

$T_a$  : Température ambiante

peut être calculé, au moment de la constitution de la matrice, sur tout élément linéique ou en tout noeud de la surface, le rayonnement multiréflexion nécessite pour le calcul des matrices [ A ] et [ B ], de tenir compte de l'influence mutuelle de certains noeuds que la discrétisation de la géométrie en éléments ou en grille, rendent indépendants.

L'élaboration d'un macro-élément radiatif consiste à superposer à la discrétisation géométrique usuelle, un élément regroupant tous les noeuds intervenant dans le calcul des échanges radiatifs multiréflexion. Le calcul des flux rayonnés, l'intégration et l'assemblage sont effectués sur cet élément au même titre que l'intégration de l'équation de conduction sur un élément traditionnel.

#### b) Reconnaissance topologique et calcul des coefficients de forme.

Les coefficients de forme  $F_{i,j}$  entre deux surfaces i et j peuvent être obtenus par la méthode de Hottel ou par la méthode projective, selon le type de géométrie du problème. Dans les deux cas, il est important de tester, avant tout calcul, si une partie du flux émis par la surface i peut atteindre la surface j. Dans la négative, la valeur du coefficient de forme est nulle.

Dans une base de données topologiques d'un problème bidimensionnel constituée

- de points
- de lignes supportées par ces points
- de contours fermés supportés par ces lignes
- de surfaces bordées par ces contours et divisées en éléments
- de frontières supportées par les lignes et divisées en éléments de frontière
- de régions constituées d'une ou plusieurs surfaces

la représentation d'une surface émettrice  $S_i$  est réduite à une frontière séparant deux régions. L'analyse systématique de cette base de données pour chaque couple d'éléments de frontière  $[S_{ik}, S_{jl}]$  avec

$S_{ik}$  : élément de frontière numéro  $k$  de la frontière numéro  $i$ ,

$S_{jl}$  : élément de frontière numéro  $l$  de la frontière numéro  $j$ ,

permet de mener à bien le test mentionné ci dessus.

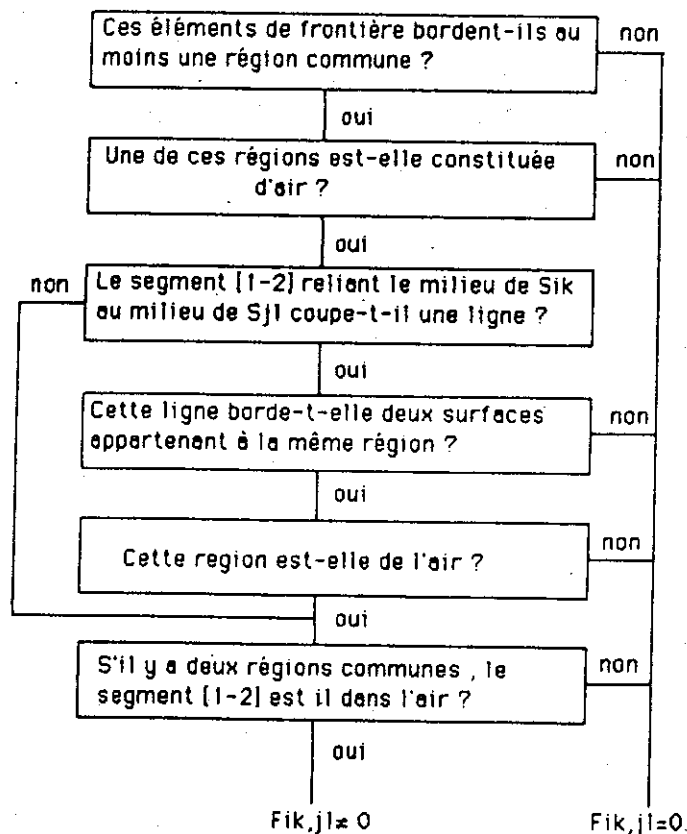


Figure II.20 Test de couplage entre deux éléments de frontière rayonnant dans le cas d'une géométrie cartésienne.



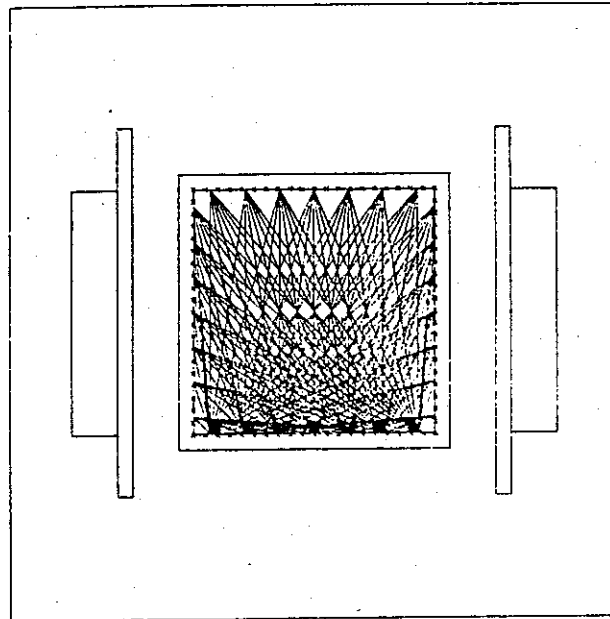


Figure II.21 Visualisation du flux échangé entre une paroi et les trois autres parois d'une enceinte close .

c ) Calcul du flux radiatif et résolution .

Après définition de toutes les frontières émettrices, il est possible de construire la matrice carrée des facteurs de forme entre tous leurs éléments de frontière . L'élaboration des matrices  $[A]$  et  $[B]$  ( 9 ) à partir de cette première matrice et des valeurs de l'émissivité sur chaque frontière est immédiate . Connaissant la valeur de la température en tout noeud des éléments de frontière utilisés, une température moyenne peut y être calculée pour constituer le vecteur  $[\epsilon \sigma \cdot T_i^4]$  . La résolution du système ( 9 et 10 ), permet de calculer la valeur du flux perdu sur chacun des éléments de frontière .

Cette valeur peut alors être redistribuée sur les noeuds de l'élément et intégrée au même titre qu'une densité de source linéique, un flux radiatif ou un flux convectif.

Remarques :

- Comme indiqué au paragraphe 2, le système ( 9 et 10 ) est, soit résolu par une méthode classique à chaque pas de temps ( émissivité dépendante de la température ou nombre de pas de temps faible ), soit la matrice [ A ] est inversée de manière à obtenir [  $\varnothing$  ] en multipliant [ B ] par [  $A^{-1}$  ] et par [  $\epsilon \sigma_i T_i^4$  ].

- Les flux d'émissivité étant proportionnels à la puissance 4 de la température, le système final obtenu est fortement non linéaire . L'utilisation de la méthode de Newton Raphson pour linéariser ce système nécessite le calcul des termes  $\partial \varnothing_{ij} / \partial T_k$  pour élaborer la matrice Jacobienne .

Ce calcul - étant couteux ,

- nécessitant l'inversion systématique de la matrice [ A ],
- rendant la matrice Jacobienne non symétrique ,

il ne sera pas effectué car l'expérience prouve que l'erreur commise sur le Jacobien n'entrave pas le bon déroulement de la convergence de la résolution même si elle la ralentit un peu .

d) Fermeture des surfaces de calcul et prise en compte de la symétrie .

Les équations du flux rayonné décrites précédemment ne sont valables que si elles s'appliquent à la géométrie d'une enceinte close . Or dans de nombreux cas, une partie du flux émis par une surface, se perd dans l'air ambiant . Pour tenir compte de ce flux "perdu" et néanmoins rester compatible avec l'hypothèse de fermeture du domaine de calcul, nous avons modélisé l'échange radiatif sur l'ambiante comme un échange sur une surface à température constante (température ambiante) qui absorbe tout le flux qu'elle reçoit et émet un flux  $d\varnothing = \sigma_i T_a^4 ds$  . Cette surface est alors définie de manière à faire le tour du domaine d'étude ( figure II .22 ) et la valeur de la solution est indépendante de sa position .

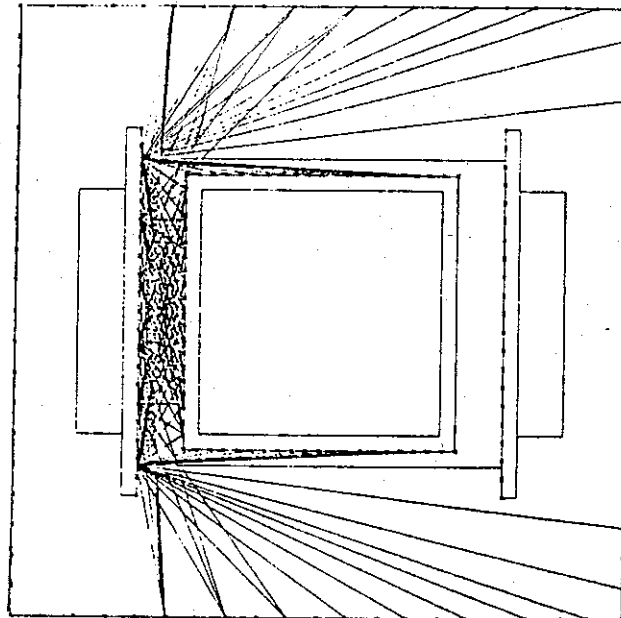


Figure II.22 Visualisation du flux échangé par un des deux écrans avec les autres frontières radiatives et notamment la frontière de fermeture.

L'utilisation de la notion de symétrie est courante en modélisation numérique pour restreindre le plus possible le domaine d'étude. Si ceci ne pose pas de problème pour le traitement des équations de conduction, il n'en est pas de même lors du calcul du flux rayonné. En effet, la figure II. montre que la restriction du domaine d'étude revient à négliger le flux échangé entre la partie conservée et le reste du domaine initial. C'est pourquoi un traitement spécifique des symétries doit être effectué pour recréer l'ensemble du flux radiatif lors de la construction de la matrice radiative du macro élément. Pour résoudre ce problème, on peut envisager modéliser une ligne de symétrie par un miroir parfait ( $\epsilon=0$ ) mais l'hypothèse d'un rayonnement diffus conduit à des erreurs importantes. Un algorithme permettant de recréer l'ensemble des échanges radiatifs a dû

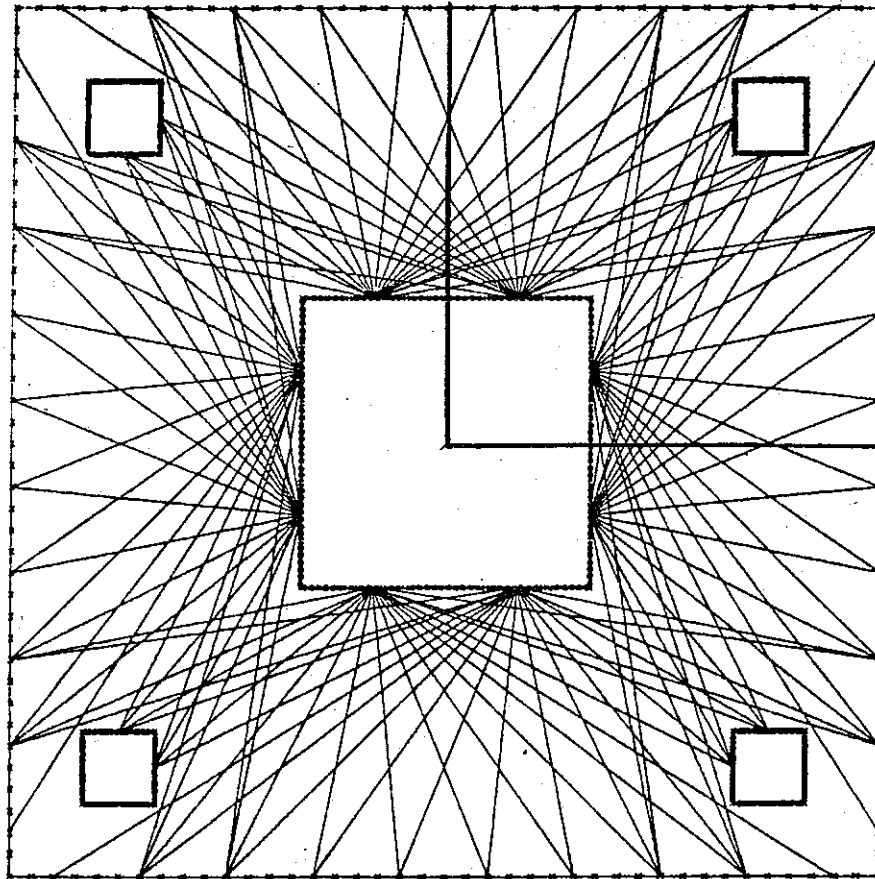


Figure II.23 Mise en valeur du flux traversant une ligne de symétrie .

être développé . Il symétrise l'un après l'autre les éléments des frontières émettrices par rapport à la ligne de symétrie pour obtenir un élément radiatif fictif, puis pour l'ensemble des autres éléments, calcule les coefficients de forme pour chaque couple ainsi formé et assemble leur contribution dans la matrice du macro élément au même titre qu'un échange entre deux éléments de frontière classique . Cet algorithme est représenté figure II.24 .

#### 4. Exemple d'utilisation .

Pour illustrer la description de ce macro élément, nous avons choisi l'exemple d'un inducteur non refroidi chauffant un matériau amagnétique . Par échange radiatif, une forte quantité de chaleur va atteindre l'inducteur dont la température va s'élever . Le flux radiatif émis par la charge est

représenté figure II.25 et l'élévation de température en un point de la charge et en un point de l'inducteur au cours du temps est visible sur la figure II.26

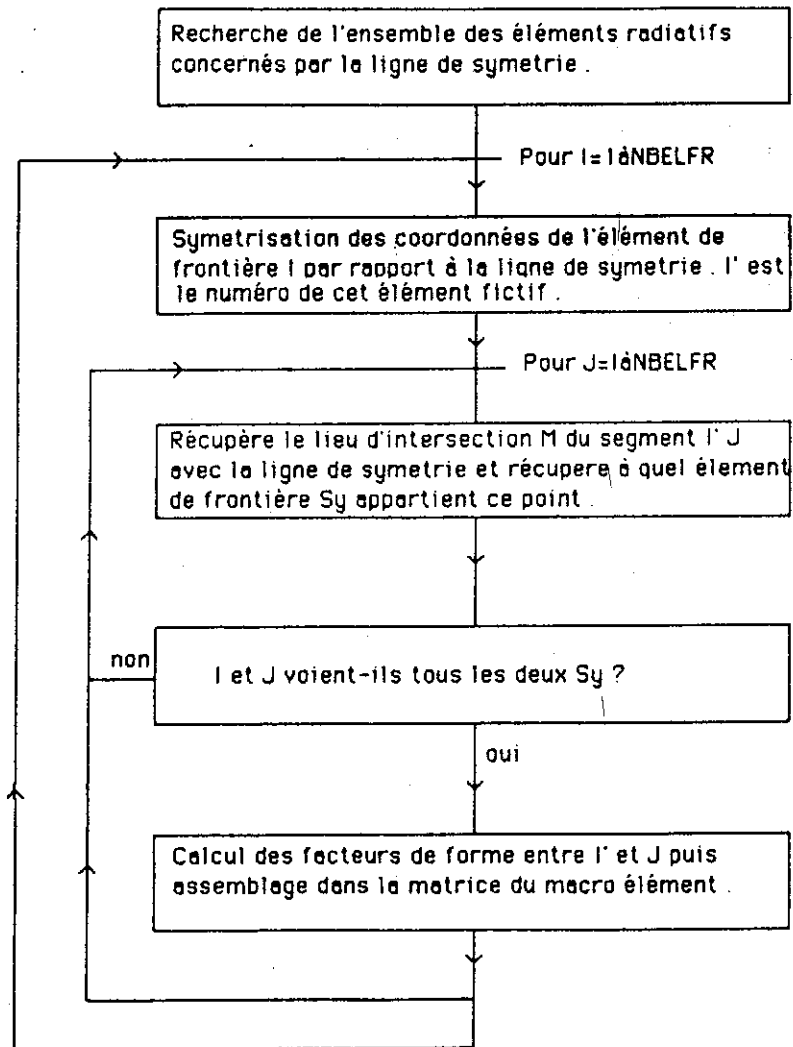


Figure II.24 Algorithme de calcul du flux radiatif émis par une ligne de symétrie.

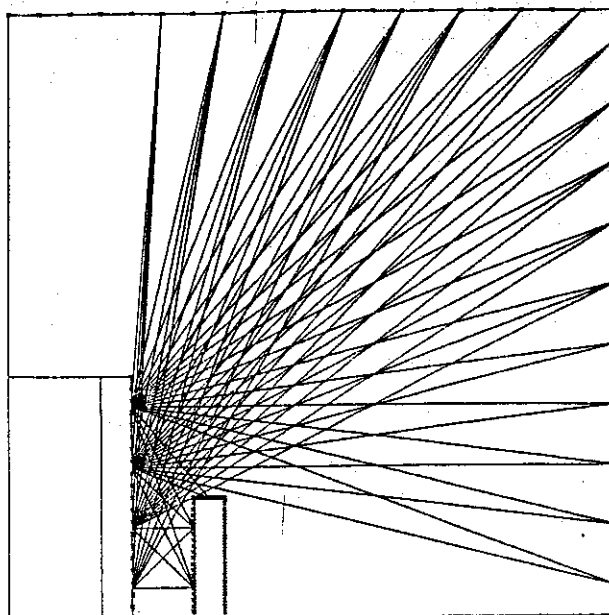


Figure II.25 Visualisation du flux émis par la surface de la charge .

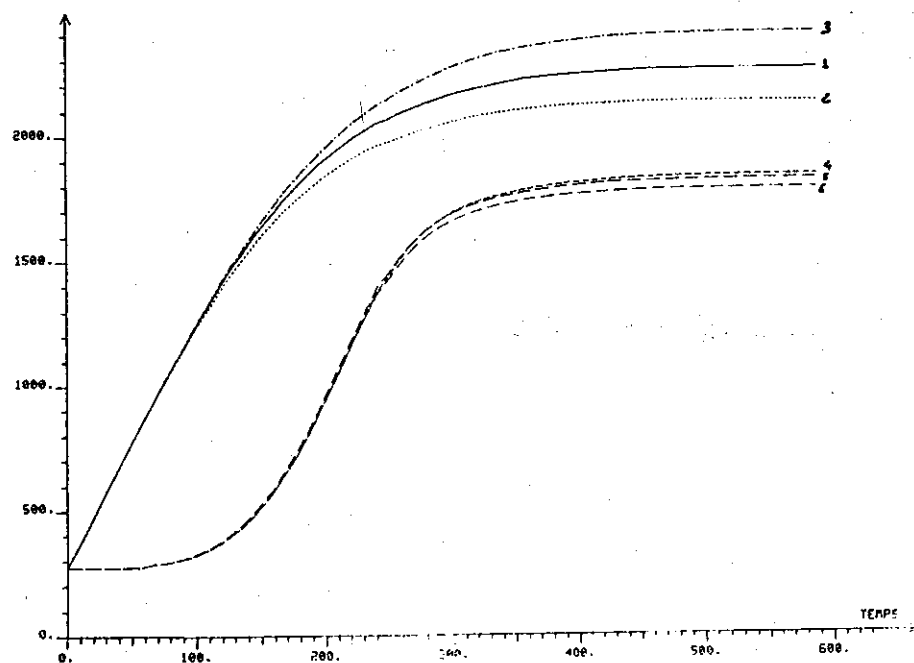


Figure II.26 Evolution de la température en différents points de la charge et de l'inducteur ( non refroidi ), au cours du temps .



## CONCLUSION

Le but que nous avons poursuivi au cours de l'élaboration des outils et des méthodes précédents était de mettre en place une structure générale de modélisation de phénomènes physiques couplés.

L'utilisation de l'algorithme de prédiction correction et des techniques de résolutions parallèles permet d'optimiser sensiblement le temps nécessaire à la simulation numérique de tels problèmes.

A partir des techniques de commande des automates séquentiels, l'élaboration du moniteur Grafcet pour superviser et contrôler la séquence de simulation de phénomènes couplés, permet de seconder efficacement le concepteur en automatisant la conduite de cette simulation.

Enfin, la mise au point d'un macro-élément radiatif pour la prise en compte des échanges multireflexions et d'une méthode de paramétrisation des propriétés physiques, permet de modéliser des installations de traitement thermique qui, jusqu'à présent, échappaient aux domaines d'application des logiciels existants.





### **CHAPITRE III . CASSIOPEE : un ensemble de logiciels d'aide à la conception d'installations de chauffage par induction .**

**\*\*\*\*\***



## INTRODUCTION .

Pour être efficace, un système de conception assistée par ordinateur doit concilier la simplicité d'utilisation, la rapidité d'exécution et une bonne souplesse d'adaptation au problème rencontré. Une organisation du système en une série de plusieurs logiciels, basés sur des méthodes numériques différentes, utilisant les techniques développées au chapitre précédent et un dialogue homme-machine totalement interactif nous a paru répondre honorablement à ces préoccupations . Il va de soi qu'un travail de deux ans n'a pas permis de construire une panoplie de logiciels permettant de résoudre tous les problèmes de modélisation en chauffage par induction, mais nous pensons que les deux logiciels réalisés peuvent être considérés comme une base solide pour l'élaboration d'un système général qu'il sera possible de compléter dans le futur par l'adjonction de nouveaux programmes au fur et à mesure de l'avancement de la recherche dans ce domaine .



### III.1 - CHLOE : Un système de simulation numérique d'installations de chauffage par induction au défilé.

#### 1. Introduction.

L'utilisation de l'induction lors des opérations de réchauffage avant formage, est de plus en plus fréquente lorsqu'il s'agit de faibles ou de moyens débits. Le choix de cette méthode est souvent dû à son bon rendement, mais aussi à la souplesse d'utilisation qu'apporte l'énergie électrique en permettant de faire facilement varier la densité de puissance thermique injectée. Ainsi, une meilleure homogénéisation de la température dans la pièce à chauffer peut être obtenue. Ces qualités ne peuvent justifier un tel choix que si l'inducteur est parfaitement bien adapté à la charge, et si la densité de puissance injectée reste compatible, à tout moment et en tout point, avec la valeur maximale du gradient de température permis par les contraintes métallurgiques.

Il nous a paru intéressant d'élaborer un logiciel de C.A.O. pour ces installations, permettant d'optimiser les caractéristiques de l'inducteur à partir d'une simulation rapide de l'évolution magnétique et thermique au cours du temps. Par essais successifs, une courbe de variation de la puissance en fonction de l'instant de chauffage, peut être obtenue et servir de référence à une régulation du système, assurant ainsi une homogénéisation de la température.

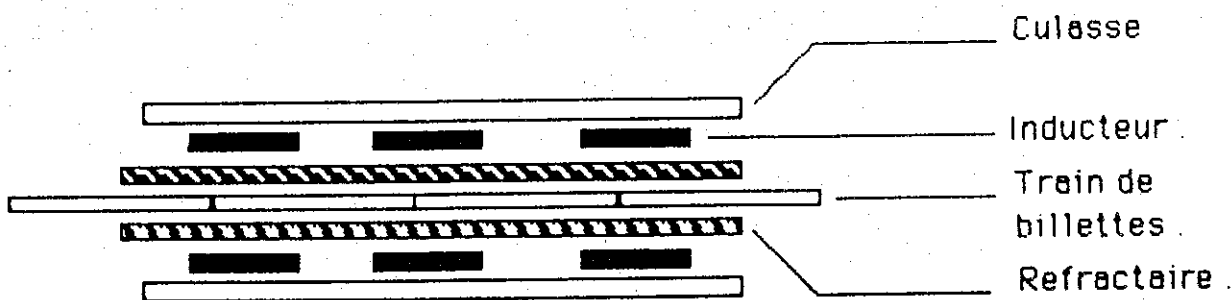


Figure III.1 Représentation schématique d'une chauffeuse au défilé.

## 2. Hypothèses de modélisation .

Dans le but d'obtenir un système rapide et ne nécessitant que peu de place mémoire, implantable sur microcalculateur, certaines hypothèses furent nécessaires .

- \_ Seuls les systèmes de chauffage par induction au défilé peuvent être modélisés .
- \_ Les billettes chauffées doivent être de section circulaire constante .  
Si la section est carrée, une section circulaire équivalente est automatiquement calculée .
- \_ Chaque inducteur de l'installation est suffisamment long pour permettre de considérer que le champ magnétique est uniforme à l'intérieur de celui-ci . L'expression analytique  $H=NI/L$  peut alors être utilisée .
- \_ Si le défilement des billettes est continu, la section de celles ci est suffisamment petite pour considérer que la température  $y$  est uniforme.
- \_ Si le défilement des billettes est en pas à pas, la température de chaque point situé à une égale distance de l'axe est la même . La densité de puissance injectée dans la billette ne dépend pas de l'abscisse  $z$  .

Ces hypothèses permettent de considérer que la géométrie du problème est unidimensionnelle . Dans ce cas, la méthode des différences finies est préférable pour sa simplicité .

Si les hypothèses se révèlent trop restrictives, l'utilisateur peut déterminer certaines caractéristiques globales de son système avec ce logiciel, puis affiner son étude sur un logiciel bidimensionnel ou tridimensionnel .

## 3. Le système CHLOE .

CHLOE est un système interactif . Sa structure est classiquement organisée en :

- un processeur de description du problème .
- un processeur de résolution des équations .
- un processeur d'exploitation des résultats .
- un processeur de sauvegarde du travail effectué ou de restauration d'une ancienne étude .

Ce système conversationnel monobloc, permet à l'utilisateur de se déplacer instantanément d'un processeur vers un autre pour modifier une donnée, résoudre ou visualiser l'effet de cette modification, optimisant ainsi par essais successifs, le dimensionnement de l'inducteur et la courbe d'évolution de la puissance injectée.

a) Le processeur de description.

La description des données nécessaires à la simulation est divisée en quatre parties.

- Description des caractéristiques géométriques de la billette .
  - + Longueur
  - + Type de section ( carrée ou circulaire ).
  - + Diamètre (ou coté ) extérieur .
  - + Diamètre ou coté intérieur ( modélisation des billettes creuses ).

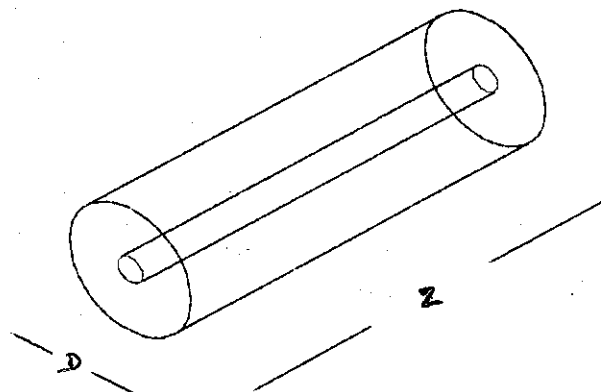


Figure III.2 Visualisation sur l'écran de la description de la billette .

- Description des caractéristiques géométriques de l'inducteur .
  - + Nombre d'inducteurs .
  - + Longueur de chaque inducteur .
  - + Diamètre intérieur des inducteurs .
  - + Nombre de couches réfractaires .
  - + Epaisseur de chaque couche réfractaire .



- + Valeur minimum de l'entrefer compte tenu de la manipulation et du flambage des billettes .
- + Coefficient de répartition de la puissance installée dans chaque inducteur .
- Description des propriétés physiques des matériaux.

L'utilisateur du système CHLOE dispose d'une mini banque de matériaux . Pour chaque nouveau matériau, les propriétés physiques (résistivité , perméabilité magnétique .... ) sont décrites à l'aide de modèles mathématiques prédéfinis ( II.3 ) (figures 3.3 et 3.4) .

- Description du cahier des charges .
  - + Température ambiante .
  - + Température finale escomptée .
  - + Débit de l'installation en t/h .
  - + Type de défilement ( continu ou pas à pas ) .

#### b) Le processeur de résolution .

Selon le type de défilement des billettes, la méthode de résolution varie .

— Dans le cas d'un défilement continu, la température d'une section de billette est supposée uniforme . De ce fait, la résistivité électrique est constante dans cette section et une valeur moyenne de la perméabilité magnétique peut être calculée .

L'équation magnétique du champ H dans la billette

$$d^2H/dr^2 + 1/r \cdot dH/dr - \sigma(T_0)\mu(T_0)dH/dt = 0$$

avec

$T_0$  : température de la section .

et les conditions aux limites

$$\begin{aligned} H(r_0) &= H \sin(\omega t) \\ (dH/dr)_0 &= 0. \end{aligned}$$

possède une solution analytique connue .

$$H(r) = H_0 \frac{\text{ber}\sqrt{2\alpha}r + j\text{bei}\sqrt{2\alpha}r}{\text{ber}\sqrt{2\alpha}r_0 + j\text{bei}\sqrt{2\alpha}r_0}$$

avec  $\alpha = 1/p$ ,  $p = (2/\omega\sigma(T_0)\mu(T_0))^{0.5}$ , et où  $\text{ber}$  et  $\text{bei}$  sont les fonctions de Bessel usuelles.

Les densités de puissance active et réactive peuvent être exprimées analytiquement au moyen des formules suivantes

$$dP = H_0^2/2p\sigma \cdot F(X) \cdot 2\pi r_0 dz$$

$$dQ = H_0^2/2p\sigma \cdot G(X) \cdot 2\pi r_0 dz$$

avec

$$X = r_0 \sqrt{2/p}$$

et

$$F(X) = \frac{(\text{ber}(X)\text{ber}'(X) + \text{bei}(X)\text{bei}'(X))}{\text{ber}^2(X) + \text{bei}^2(X)}$$

$$+ j \frac{(\text{ber}(X)\text{ber}'(X) - \text{bei}(X)\text{bei}'(X))}{\text{ber}^2(X) + \text{bei}^2(X)}$$

$$G(X) = \frac{(\text{ber}(X)\text{bei}'(X) - \text{bei}(X)\text{ber}'(X))}{\text{ber}^2(X) + \text{bei}^2(X)}$$

$$+ j \frac{(\text{ber}(X)\text{bei}'(X) + \text{bei}(X)\text{ber}'(X))}{\text{ber}^2(X) + \text{bei}^2(X)}$$

Ces expressions permettent de calculer la densité de source thermique en chaque section de la billette.

L'équation des transferts de chaleur est résolue en pas à pas sur le temps, méthode implicite, en utilisant l'algorithme de prédiction correction développé au chapitre 2. Elle est linéarisée par la méthode de Newton Raphson.

- Dans le cas d'un défilement pas à pas, le système couplé doit être

résolu car la température n'étant plus uniforme dans une section, une résolution analytique de l'équation magnétique n'est plus envisageable. La formulation complexe

$$d^2H/dr^2 + 1./r .dH/dr - j\omega\sigma(T_0)\mu(T_0) = 0$$

sera utilisée.

L'automate Grafcet, décrit au chapitre 2, pilote la résolution des équations linéarisées par la méthode de Newton Raphson. Les pas de temps sont optimisés par l'algorithme de prédiction correction.

c) Processeur d'exploitation.

Le post processeur fournit à l'utilisateur plusieurs types de résultats.

— Des valeurs de paramètres de description de l'inducteur ( figure III.9 )

- + Nombre de spires en série.
- + Largeur d'une spire serie ou largeur cumulée des spires parallèles.
- + Rendement électrique de l'installation
- + Rendement thermique de l'installation

- Des valeurs de caractéristiques électriques globales

- + Puissances active et réactive à vide
- + Courant à vide
- + Impédance à vide
- + Résistance apparente
- + Pertes joule en charge
- + Puissance réactive en charge
- + Courant moyen en charge
- + Impédance moyenne en charge
- + Energie électrique dissipée par unité de masse de produit chauffée
- + Puissance électrique dissippée par unité de masse de produit chauffée

- La carte de température dans la charge à tout instant pour vérifier que le gradient thermique est compatible avec le cahier des charges ( figure III.5)

- La courbe d'évolution de la puissance échangée entre l'inducteur et la billette ( figure III.8 ).

- La courbe d'évolution de la température en différents points de la billette (figure III.6).
- Les courbes d'évolution des caractéristiques électriques globales au cours du temps (figure III.7).

#### 4. Applications du logiciel CHLOE.

La simplicité de ce logiciel qui peut apparaître comme un défaut, constitue en fait sa principale qualité pour le but que nous nous sommes fixés à savoir, prédire avec une précision suffisante le comportement thermique d'une billette chauffée au défilé à travers un inducteur et prédire les principales caractéristiques électriques du système pour s'assurer de la compatibilité de l'installation avec le cahier des charges. Une étude préalable sur ce logiciel peut conforter les intuitions du concepteur et épargner une dépense de temps et d'argent beaucoup plus importante s'il avait fallu effectuer toute l'optimisation sur un système de simulation plus précis mais obligatoirement plus gourmand.

Une extension d'utilisation de ce programme est à l'étude pour que les résultats de la simulation soient utilisés pour commander l'installation de chauffage sur le site de production.

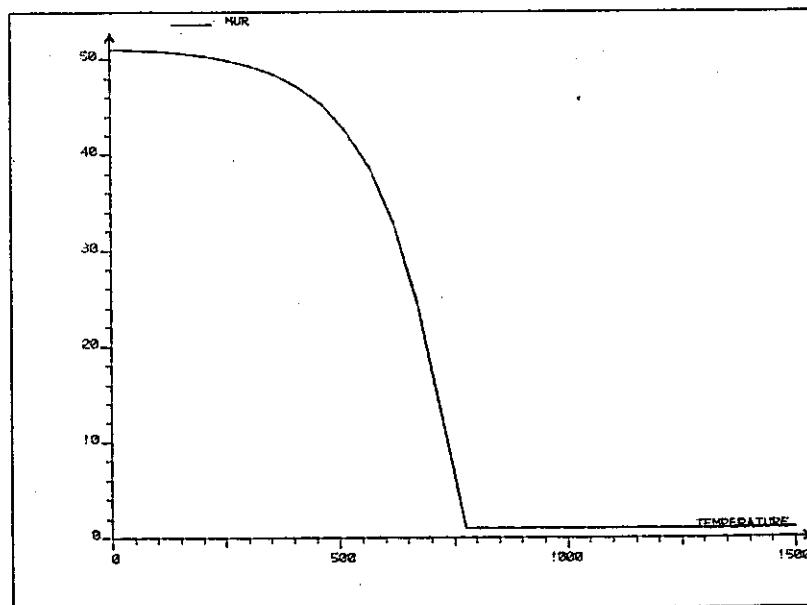


Figure III.3 Modélisation de l'évolution de la perméabilité magnétique lors du passage du point de Curie.

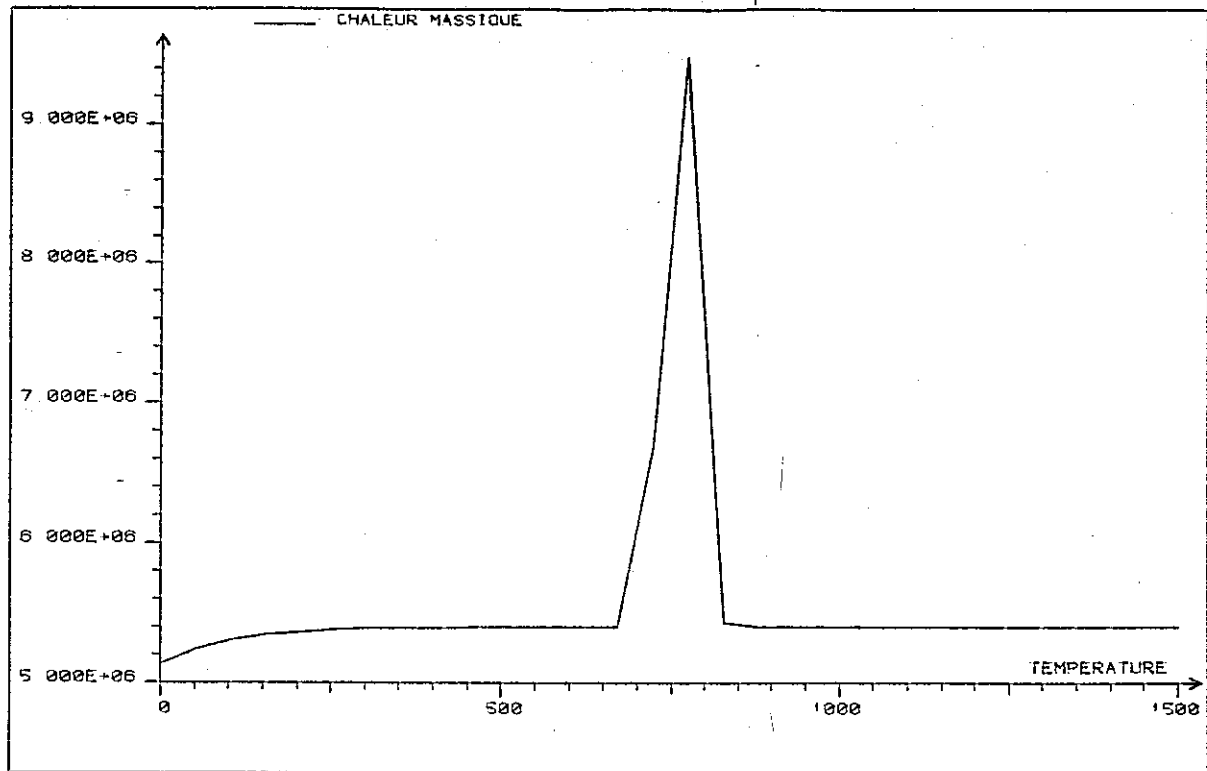


Figure III.4 Modélisation de la chaleur latente de changement de phase par accroissement de la capacité calorifique lors du passage du point de Curie.

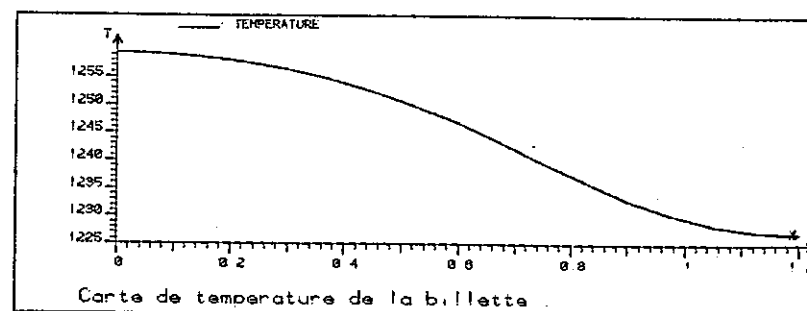
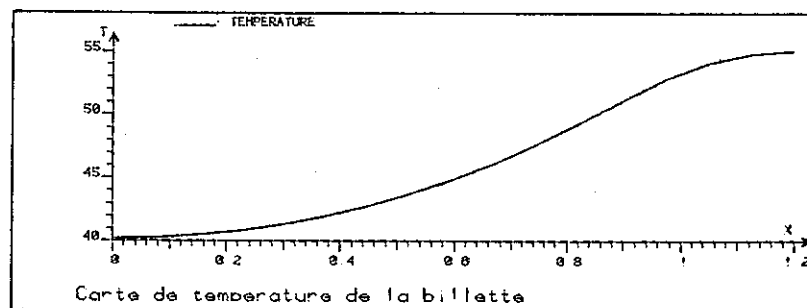


Figure III.5 Carte de température longitudinale au début et à la fin du chauffage.

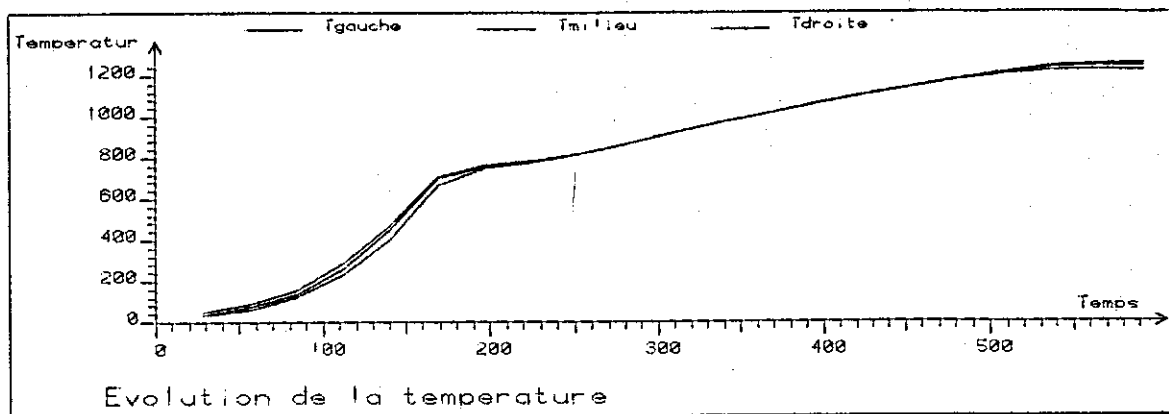


Figure III.6 Evolution de la température au cours du temps au milieu et aux extrémités de la billette.

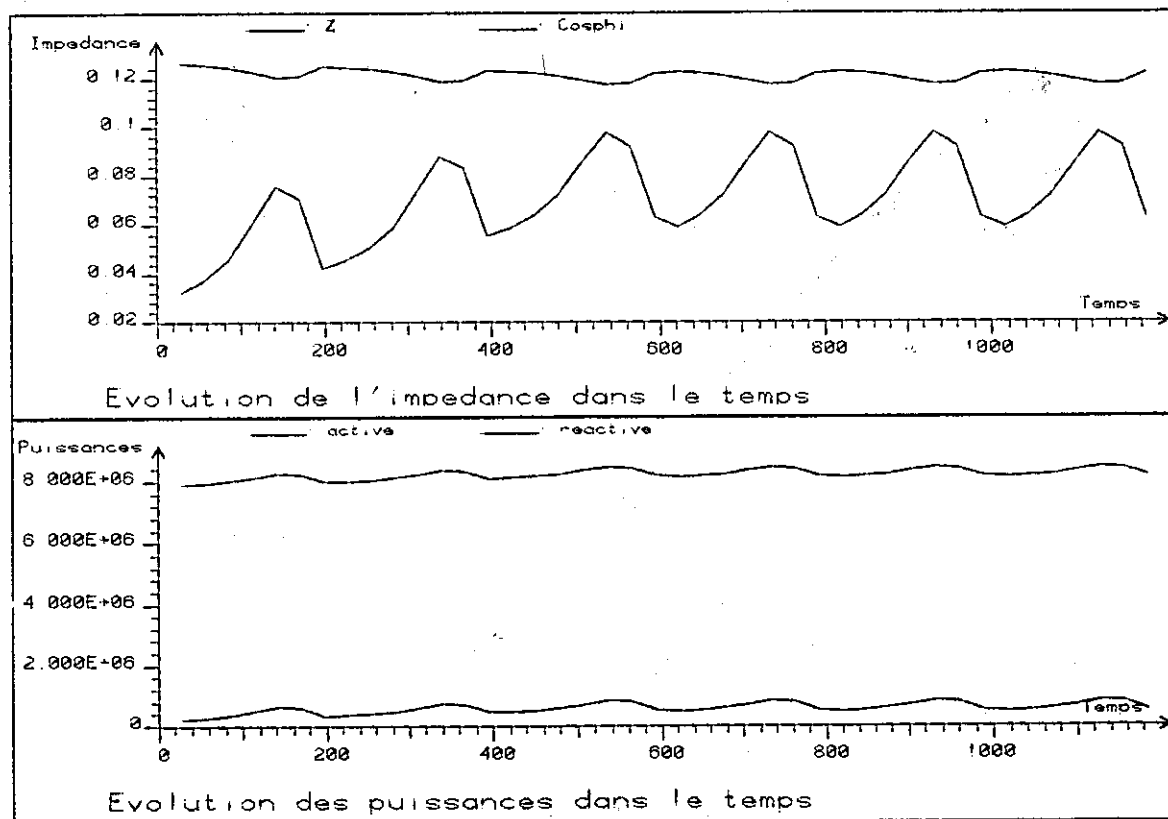
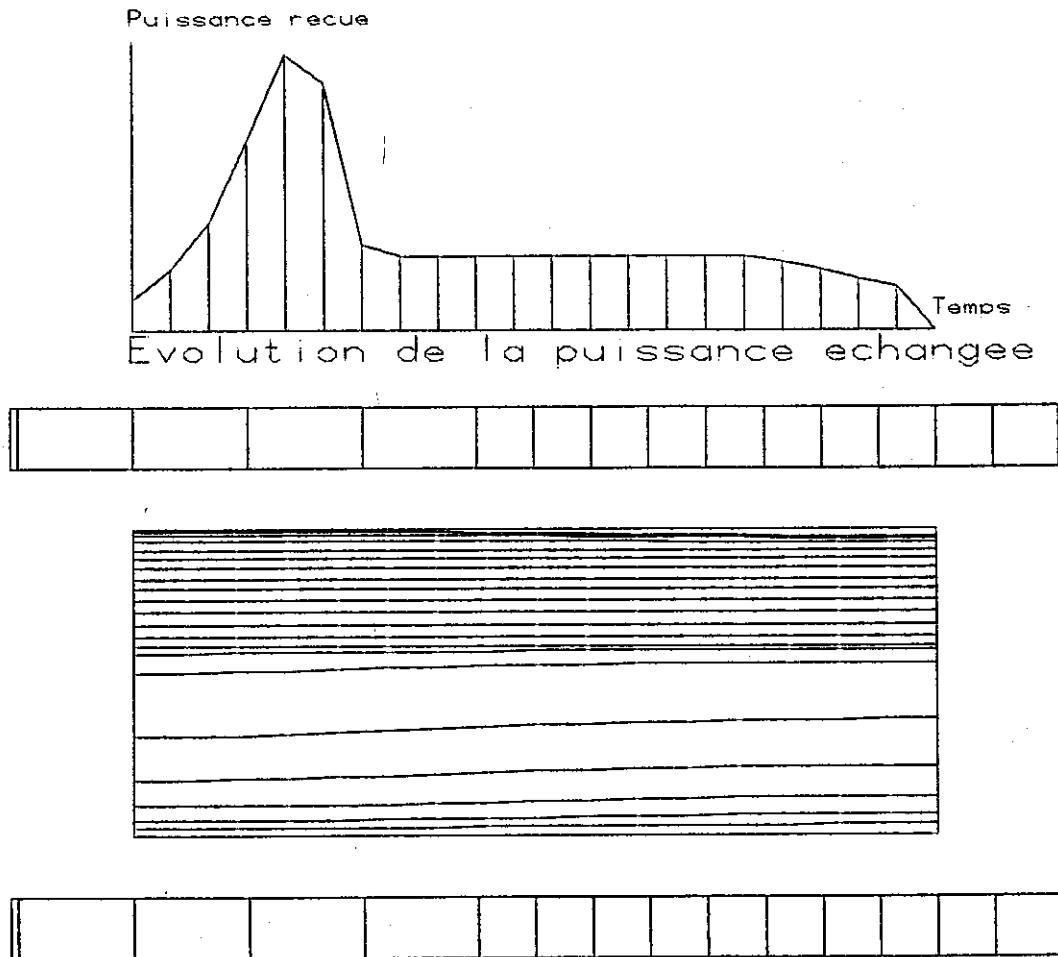


Figure III.7 Evolution des caractéristiques électriques au cours du temps.



Evolution de la carte thermique de la billette

Figure III.8 Evolution de la puissance échangée avec la billette.

```

*****
*
*                               Resultats
*
*****

CHLOE

Charge
- Vitesse de defilement en m/s ..... .43543E-02
- Temperature finale en degres C ..... .12512E+04
- Erreur relative ..... .93888E-03
- Puissance active en Kw dans la charge .56027E+03
- Puissance react. en Kvar ds la charge .56027E+03
- Pertes par rayonnement ..... .21378E+03
- Pertes par convection ..... .68696E+02

Installation
- Champ magnetique en A/T/m ..... .40497E+05
- Permeabilite magnetique relative .... .59364E+02
- Pertes joules a vide en Kw ..... .10801E+03
- Puissance reac. a vide en Kvar ..... .41189E+04
- Courant a vide ..... .41203E+04
- Impedance a vide ..... .24270E+00
- Cosinus phi a vide ..... .26213E-01
- Resistance apparente ..... .63620E-02
- Pertes joules en charge en Kw ..... .11080E+03
- Puissance active totale en Kw ..... .67107E+03
- Puissance reactive totale en Kvar .... .44183E+04
- Puissance totale en Kva ..... .44690E+04
- Courant moyen en charge ..... .41732E+04
- Impedance moyenne en charge ..... .23962E+00
- Cosinus phi ..... .15016E+00
- Rendement electrique ..... .83490E+00
- Rendement thermique ..... .49583E+00
- Energie dissipee en Kwh/kg ..... .41942E+00
- Puissance dissipee en Kw/t ..... .21915E+04

Inducteur
- Tension de sortie du generateur ..... .10000E+04
- Coefficient de remplissage ..... .80000E+00
- Nombre de spires de l'inducteur ..... 29.
- Nombre de spires series ..... 29.
- Nombre de spires parralleles ..... 1.
- Largeur d une spire en mm ..... .82759E+02

```

Figure III.9 Quelques résultats d'une simulation.



### III.2 - CELES-MAGNETOTHERMIQUE : un logiciel éléments finis pour la modélisation des phénomènes magnéto-thermiques couplés.

#### 1. Introduction.

Jusqu'à présent, la conception des inducteurs était réalisée grâce à la connaissance et au savoir faire que les ingénieurs avaient acquis empiriquement au cours des ans, essai après essai. Mais l'empirisme comme l'intuition a ses limites et puisque les applications de l'induction sont de plus en plus nombreuses en traitements thermiques de surface et en traitements spéciaux, la simulation numérique doit apporter sa contribution notamment dans les cas où une précision importante de la température dans la pièce à chauffer est imposée. Il nous a semblé nécessaire de concevoir un logiciel de calcul bidimensionnel pour fournir aux ingénieurs des bureaux d'étude un nouvel outil de C.A.O. en chauffage par induction dont les possibilités couvriront un nombre important de cas rencontrés dans l'industrie. C'est ce logiciel, dont nous avons déjà dit quelques mots au chapitre II, que nous allons présenter dans cette partie.

#### 2. Fiche signalétique.

Un logiciel de C.A.O. est un outil à la disposition des concepteurs d'installations. A ce titre il possède un domaine d'application que l'utilisateur doit connaître sous peine d'obtenir des résultats erronés. L'expérience prouve que bien souvent, les erreurs imputées aux logiciels de modélisation sont le fait d'une méconnaissance de leurs limites d'utilisation.

Le logiciel CELES-magnétothermique a pour objet la simulation numérique du chauffage par induction pour des géométries bidimensionnelles cartésiennes ou axisymétriques et des fréquences compatibles avec l'emploi de la méthode des éléments finis ( limite variable selon la dimension des pièces à chauffer et selon l'épaisseur de peau magnétique ). Il est une extension du logiciel FLUXLAB développé au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble. Il comporte de plus le logiciel Gräfcet et les outils décrits précédemment.

Les différents types de problèmes pris en compte par ce logiciel sont :

- 1 - Magnétodynamique cartésien résolution pas à pas .
- 2 - Magnétodynamique axisymétrique résolution pas à pas .
- 3 - Magnétodynamique cartésien résolution complexe .
- 4 - Magnétodynamique axisymétrique résolution complexe .
- 5 - Magnétodynamique orthogonal cartésien résolution complexe  
( le plan de résolution est le plan des courants ) .
- 6 - Thermique cartésien .
- 7 - Thermique axisymétrique
- 8 - Couplage Magnétothermique cartésien pas à pas . 1+6
- 9 - Couplage Magnétothermique axisymétrique pas à pas . 2+7
- 10 - Couplage Magnétothermique cartésien complexe . 3+6
- 11 - Couplage Magnétothermique axisymétrique complexe . 4+7
- 12 - Couplage Magnétothermique orthogonal cartésien complexe . 5+6

Le logiciel est disponible en deux versions .

- standard : implantable sur tout minicalcateur (VAX, APOLLO, NORISK).
- multiprocesseurs : implantable sur un réseau de minicalculateurs (APOLLO .... ) .

### 3. Structure du logiciel

L'organisation du logiciel est schématisée figure III.10 . Elle est classiquement structurée en un préprocesseur de description du problème, un processeur de résolution et un postprocesseur d'exploitation .

Pour chacune de ces parties, nous évoquerons les spécificités du logiciel CELES-magnétothermique sur le noyau originel après un rappel des principales qualités de celui-ci .

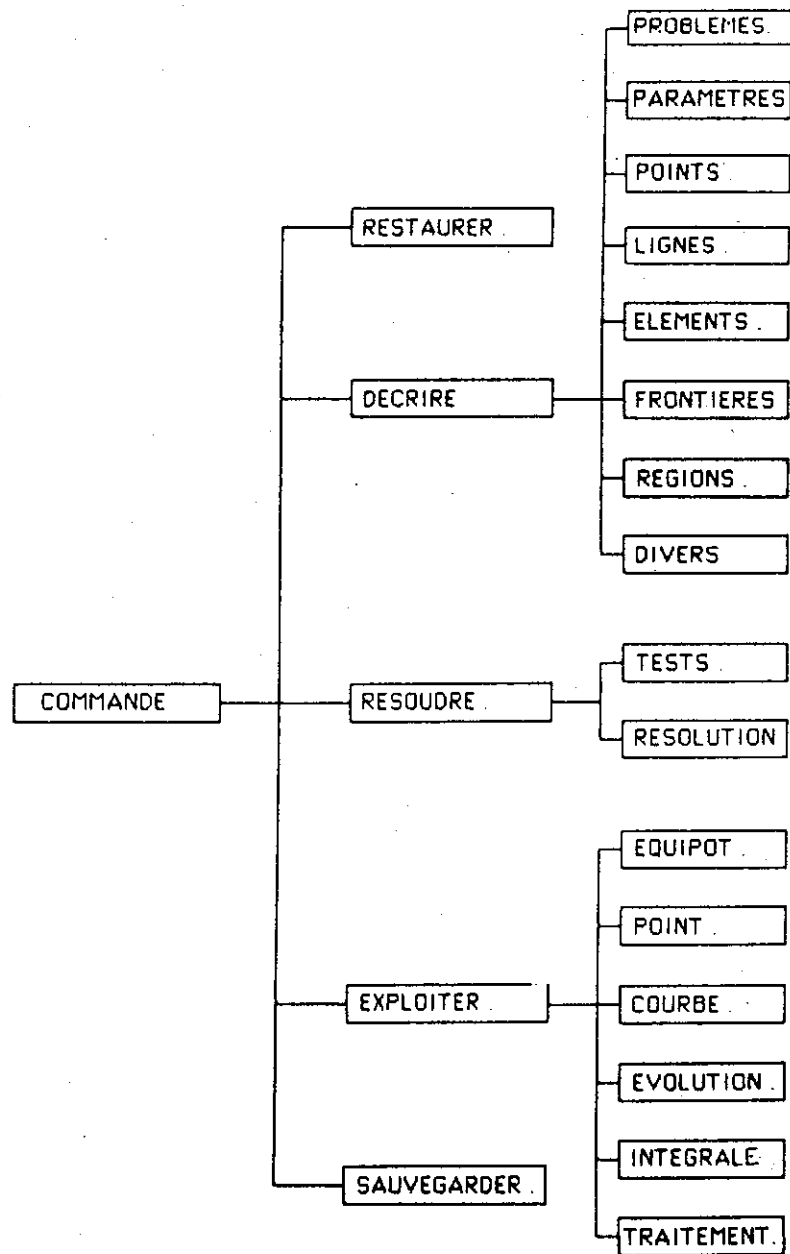


figure III .10 Représentation schématique de la structure du logiciel CELES-magnétothermique .

#### 4. Le préprocesseur .

La définition du problème nécessite la description des données suivantes .

##### a) Définition du type de problème .

L'utilisateur du système doit choisir le problème thermique et (ou) le problème magnétique qu'il souhaite résoudre. Un test de compatibilité est alors automatiquement assuré . Pour chaque type de problème, le logiciel informe l'utilisateur de la variable d'état et des variables physiques utilisées .

##### b) Définition de la géométrie .

La géométrie est décrite au moyen de paramètres, points et lignes .

- Un paramètre géométrique est défini interactivement par une formule utilisant les fonctions mathématiques usuelles et, si cela se révèle possible, d'autres paramètres géométriques . Un paramètre peut être reformulé à tout instant .

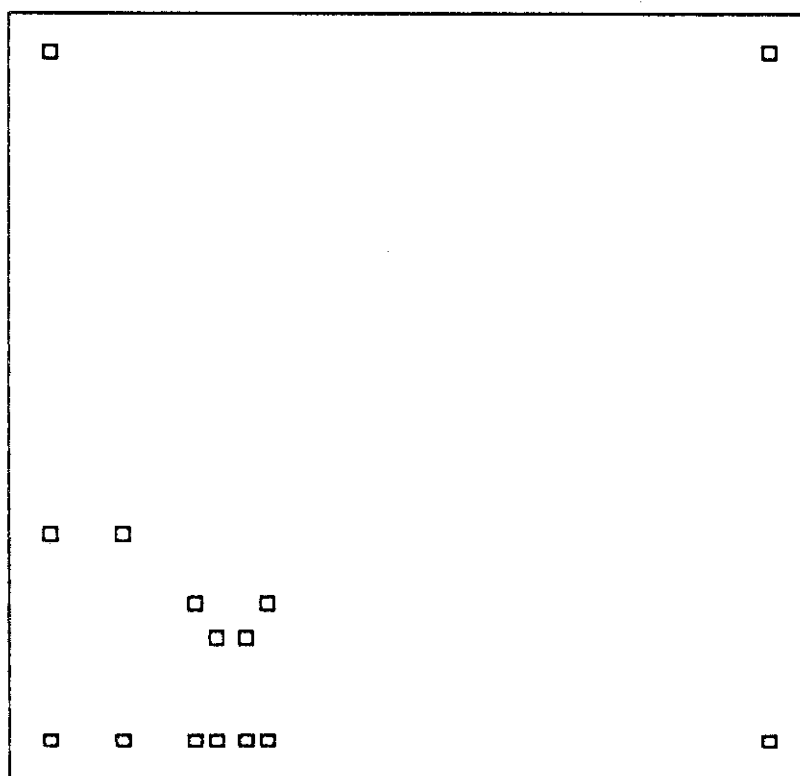


Figure III.11 Description des points de base de la géométrie .

- Les coordonnées des points de base sont définies formellement à partir des paramètres géométriques et des fonctions mathématiques usuelles . Le type de coordonnées utilisé peut être indifféremment le système cartésien ou le système polaire .

- Les lignes définissant le contour des objets à modéliser sont des segments de droite ou des arcs de cercle . Elles sont décrites en pointant les points centre ( arc de cercle ), origine et extrémité directement sur l'écran ou sur la table à digitaliser .

La gestion des banques point - ligne permet d'ajouter, supprimer, modifier une entité . La modification d'un paramètre, entraîne une modification d'une partie de la géométrie sans avoir à redéfinir les coordonnées des points qui se sont déplacés .

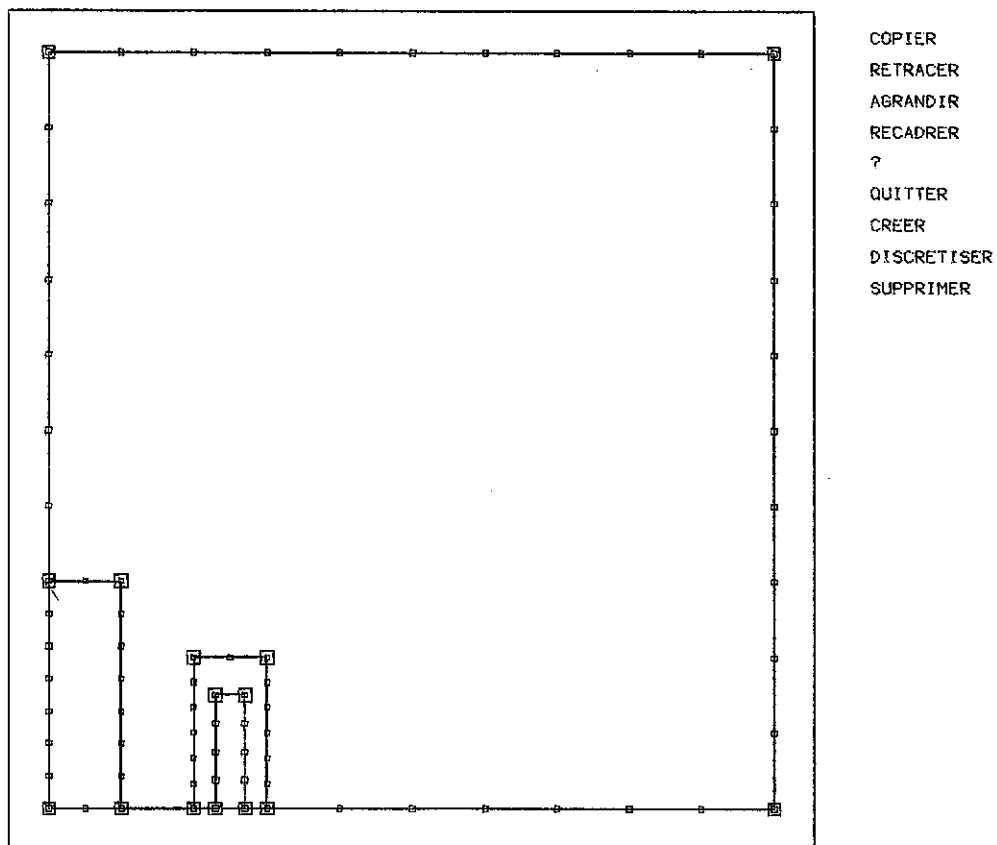


Figure III.12 Description des lignes de la géométrie .

### c) Définition du maillage éléments-finis .

Le maillage du domaine d'étude en éléments triangulaires est construit automatiquement par la méthode de Delaunay à partir des noeuds de base issus de la discrétisation des segments et arcs de cercle [8] . Pour guider le mailleur, l'utilisateur peut jouer sur le nombre et sur la place des lignes

ainsi que sur la densité de discrétisation de celles-ci. Un test permet de vérifier la qualité du maillage obtenu et un message renseigne l'utilisateur, si le maillage se révèle impossible, en lui indiquant les lignes insuffisamment discrétisées. Dans la mesure du possible, le maillage est conservé après une modification d'un paramètre géométrique. Toutefois, dans le cas d'une trop forte variation, un message prévient l'utilisateur qu'un nouveau maillage doit être effectué. Bien entendu, la destruction ou la modification d'un point ou d'une ligne entraîne la destruction du maillage existant.

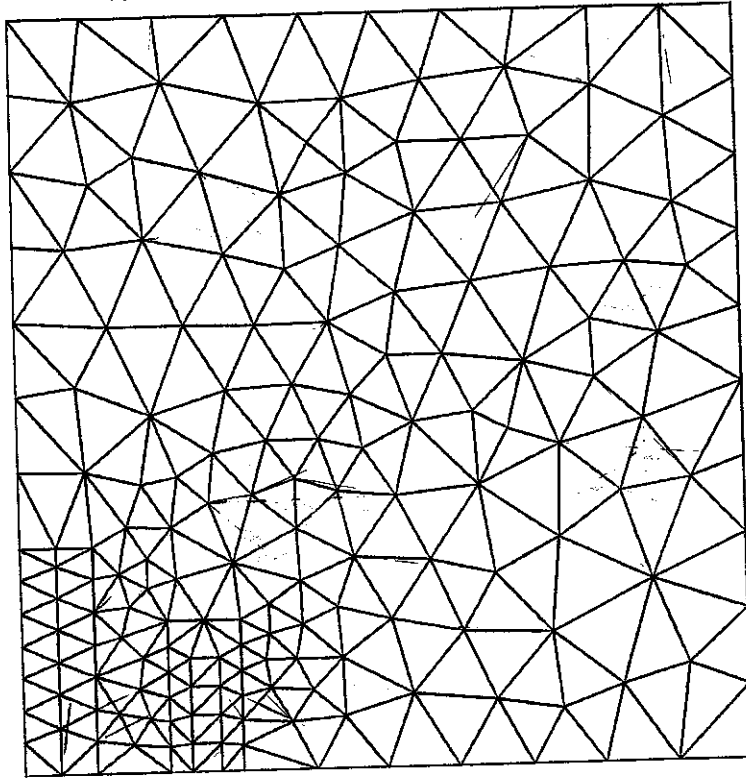


Figure III.13 Maillage éléments finis.

d) Définition des frontières et des conditions aux limites.

Une frontière est composée d'un ensemble de lignes (segments ou arcs de cercle), non forcément jointes, ayant la même définition de conditions aux limites. Cet ensemble est obtenu par pointage sur l'écran de lignes sélectionnées. Il est répertorié par un nom et un commentaire.

Les conditions aux limites qu'il est possible d'affecter à une frontière sont au nombre de quatre. Elle doivent être définies sur toutes les frontières pour chaque type de problème validé.

- Dirichlet : la valeur de  $A$  ou  $T$  sur les noeuds de la frontière est imposée.
- Neuman homogène : la valeur de  $dA/dn$  ou de  $dT/dn$  est nulle.

- Libre : cette frontière n'intervient pas dans ce problème .
- Linéique : Le flux qui traverse cette frontière n'est pas nul . Ce type de description convient pour :
  - \* des densités de source linéiques . L'utilisateur doit définir la valeur de la densité de source .
  - \* des échanges thermiques par convection . L'utilisateur doit définir les valeurs du paramètre de convection  $h$  et de la température du milieu ambiant .
  - \* des échanges thermiques par rayonnement sur l'ambiante. L'utilisateur doit définir les valeurs de l'émissivité et de la température du milieu ambiant .
  - \* des échanges thermiques par rayonnement multireflexion.

Dans ce cas l'utilisateur définit la valeur de l'émissivité . Il pointe également sur l'écran ou sur la tablette à digitaliser, l'ensemble des frontières recevant une partie du flux émis par la frontière à affecter . Une visualisation des échanges radiatifs à l'écran, lui permet de vérifier si la description est correcte .

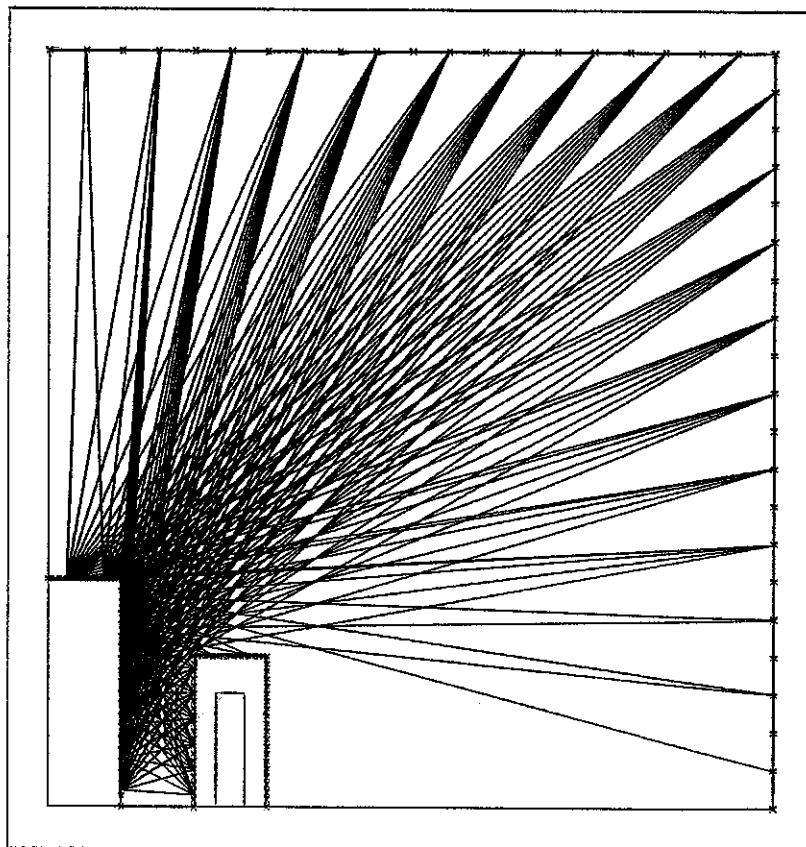


Figure III.14 Visualisation des échanges radiatifs multireflexion entre une frontière et l'ensemble du domaine d'étude .

e) Définition des régions et des propriétés physiques.

Une région est un ensemble de surfaces fermées par un contour (succession de lignes jointives), possédant une définition commune des variables physiques et pointées par l'utilisateur.

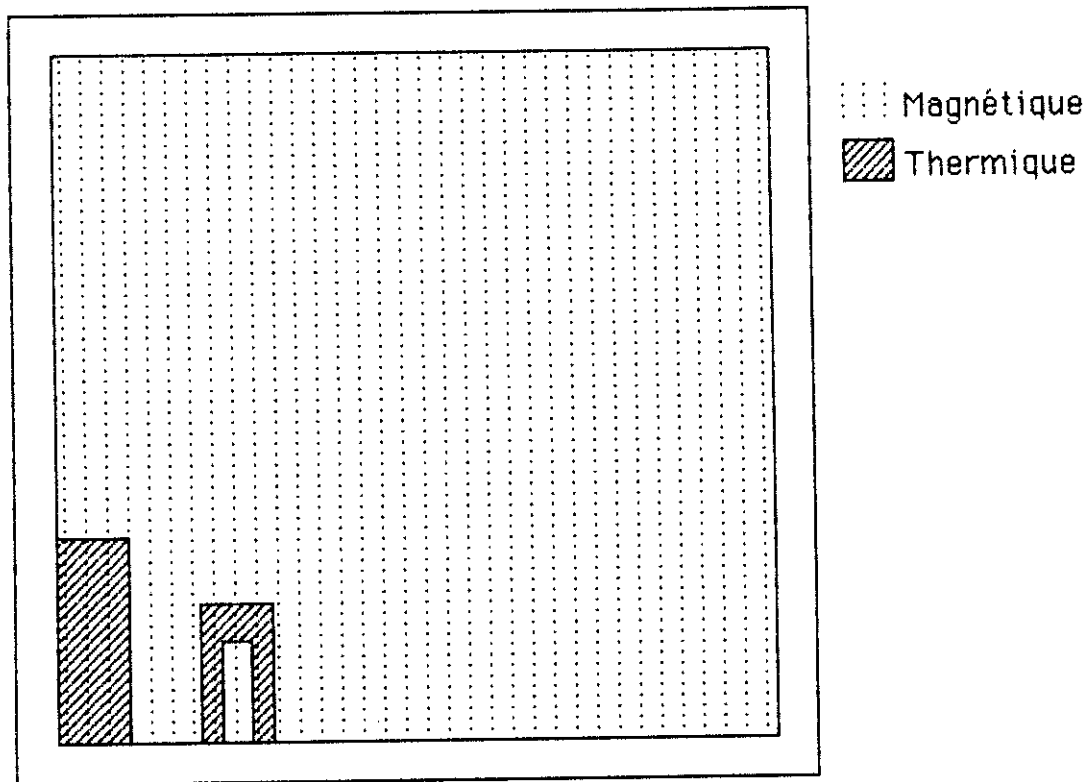


Figure III.15 Visualisation des différents domaines d'étude magnétique et thermique.

f) Définition des données complémentaires.

Dans cette rubrique sont regroupées trois sortes de commandes.

- La commande de configuration de l'automate de résolution en multiprocesseurs.
- Des commandes de test permettant de s'assurer de la bonne définition des données.
- Des commandes spécifiques qui permettent de modifier certaines parties du schéma de résolution (prise en compte par une méthode



explicite du rayonnement multireflexion, modification des tests de couplage, ... ) dans le but de faire converger "un système récalcitrant". Ces commandes constituent en quelque sorte les boutons de réglage du logiciel. Elles sont d'un accès réservé aux utilisateurs initiés aux méthodes de calcul utilisées

## 5. Le processeur de résolution.

Trois tâches principales sont effectuées par ce processeur de résolution.

### a) Définition des conditions initiales et des paramètres de résolution.

Le but visé lors de l'élaboration du processeur de résolution, était d'obtenir un outil totalement automatique, assimilable pour l'utilisateur à une boîte noire et un bouton d'activation. Ceci s'est révélé possible lors de résolution magnétique complexe mais une résolution thermique ou magnétique pas à pas nécessite les informations suivantes que l'utilisateur doit définir avant chaque résolution.

- définition de l'instant initial.
- nombre maximum de pas de temps et valeur initiale du pas pour les problèmes transitoires.
- valeur de l'instant de fin de simulation.

L'utilisation de la paramétrisation des variables physiques et linéiques en fonction du temps, pour étudier un état magnétique transitoire, impose la définition de ces paramètres même pour une résolution magnétique complexe.

### b) Intégration, assemblage et résolution du système.

La multiplicité des problèmes résolus par ce système nous a conduits à définir un schéma général d'intégration d'assemblage et de résolution du système linéaire (figure III.16 ). Quel que soit le problème, le système est linéarisé par la méthode de Newton Raphson et résolu par la méthode des gradients conjugués avec préconditionnement par la méthode de Choleski incomplète [17].

### c) Mémorisation des pas de temps pour l'exploitation.

Plus encore que le résultat final, le régime transitoire intéresse les concepteurs d'installations, notamment pour s'assurer qu'à tout instant le système est compatible avec le cahier des charges ( puissances électriques mises en jeu, gradient thermique dans la pièce à chauffer, etc...). Pour que l'utilisateur puisse avoir accès à ces informations, il est

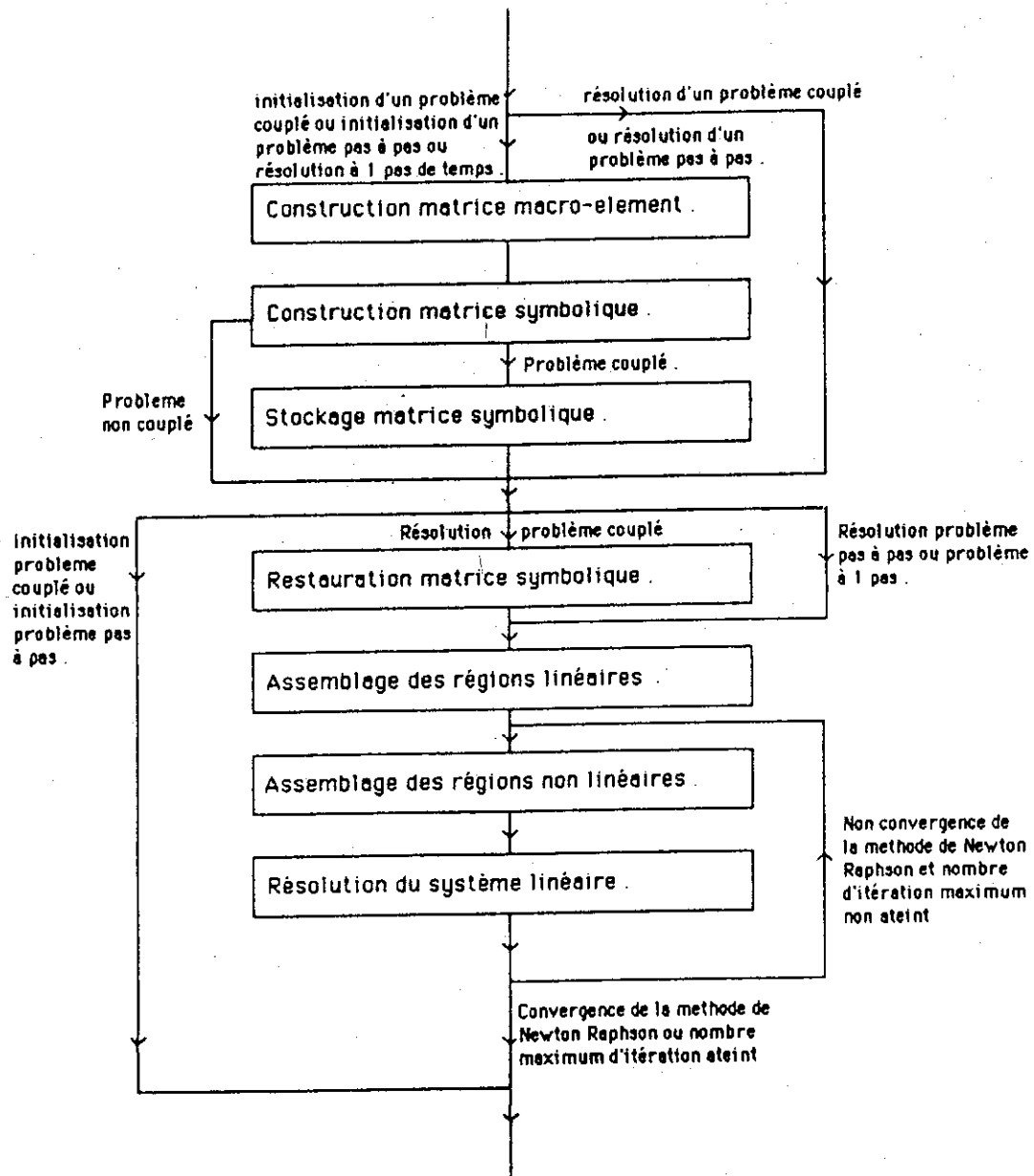


Figure III.16 Représentation du schéma général d'intégration d'assemblage et de résolution.

nécessaire de stocker les résultats obtenus à certains pas de temps, une interpolation permettant par la suite de reconstituer l'évolution au cours du temps.

Cette gestion de la mémorisation est organisé en deux parties.

— Mémorisation de grandeurs ponctuelles et globales . L'utilisateur définit un certain nombre de fonctions d'exploitation avant le début de la résolution . Elles sont choisies parmi des formules prédéfinies (T, A, MOD(A), B, pa, PA, ... ) ou décrites par l'utilisateur en fonction de formules mathématiques usuelles, des variables d'état et des variables physiques . Elle caractérisent une grandeur ponctuelle ( l'opérateur désigne sur l'écran la localisation du point ) ou globale (l'opérateur définit le domaine de calcul) . Ces fonctions sont calculées à chaque pas de temps et les résultats sont stockés de telle manière qu'ils soient directement exploitables à l'aide de la banque de traitement de courbes BIB-DIACOU .

- Mémorisation des valeurs aux noeuds . Le stockage des valeurs des potentiels aux noeuds du problème à tous les pas de temps nécessiterait pour des problèmes importants, une place mémoire considérable . Pour éviter cela, nous avons choisi de ne stocker ces valeurs qu'à intervalles réguliers définis avant chaque résolution par l'utilisateur pour chaque type de problème .

Tout calcul peut être repris à partir d'un instant quelconque d'une résolution précédente .

## 6 . Le processeur d'exploitation .

Les résultats de la simulation sont utilisés pour calculer les fonctions d'exploitation prédéfinies ou formulées par l'utilisateur à l'aide de fonctions mathématiques, des variables d'état et des variables physiques . Avec ce postprocesseur l'utilisateur du système peut visualiser

- les valeurs de grandeurs locales en tout point du domaine d'étude et à tout instant .
- les lignes équivalent de la fonction d'exploitation sur le domaine d'étude .
- la courbe d'évolution d'une grandeur ponctuelle entre deux points du domaine définis graphiquement par l'utilisateur .
- les courbes d'évolution transitoire ( cf III.2.5 ) .
- les valeurs globales sur tout ou sur une partie du domaine d'étude à tout instant de la simulation .

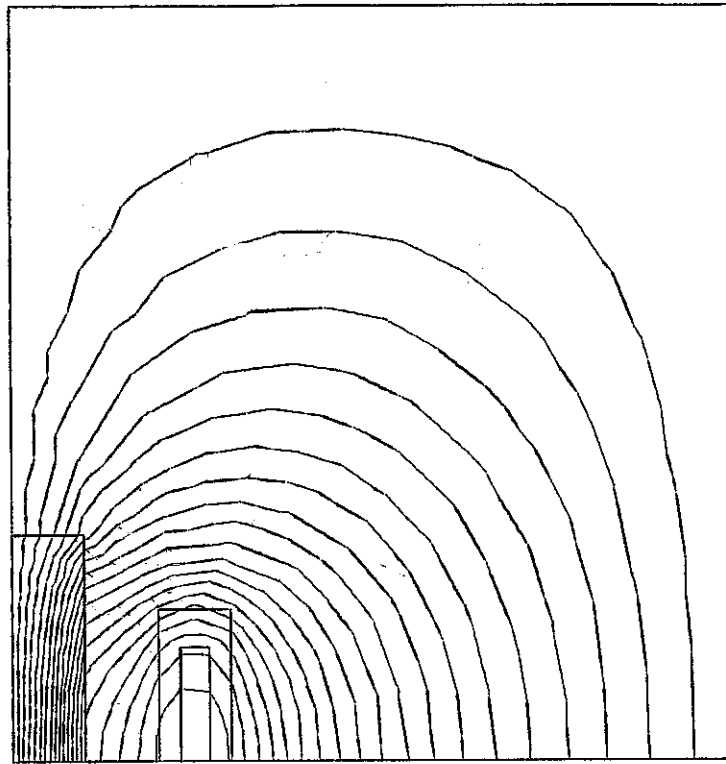


Figure III.17 Lignes équivaieurs du module de  $H$ .

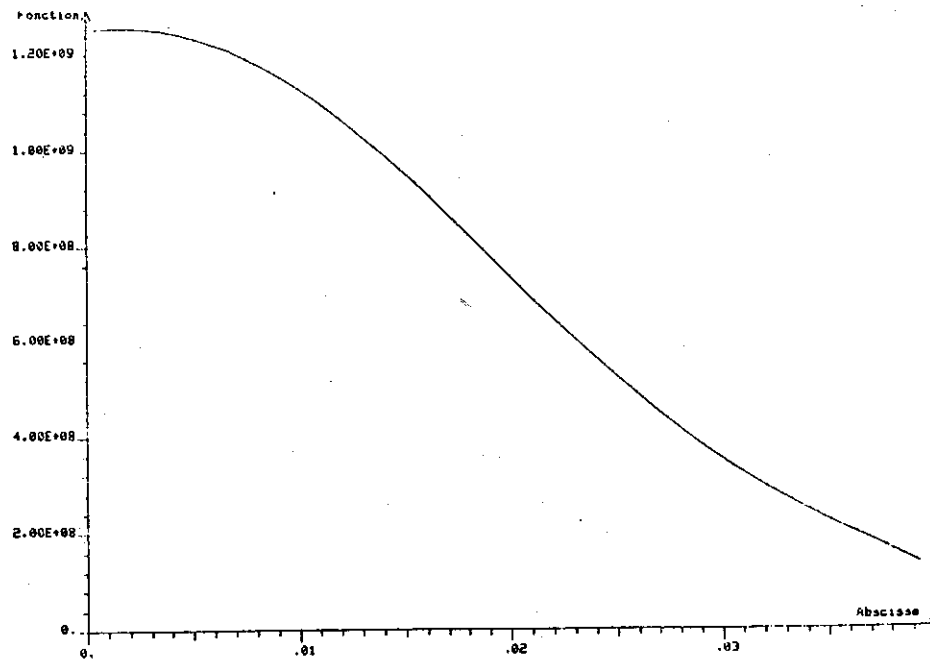
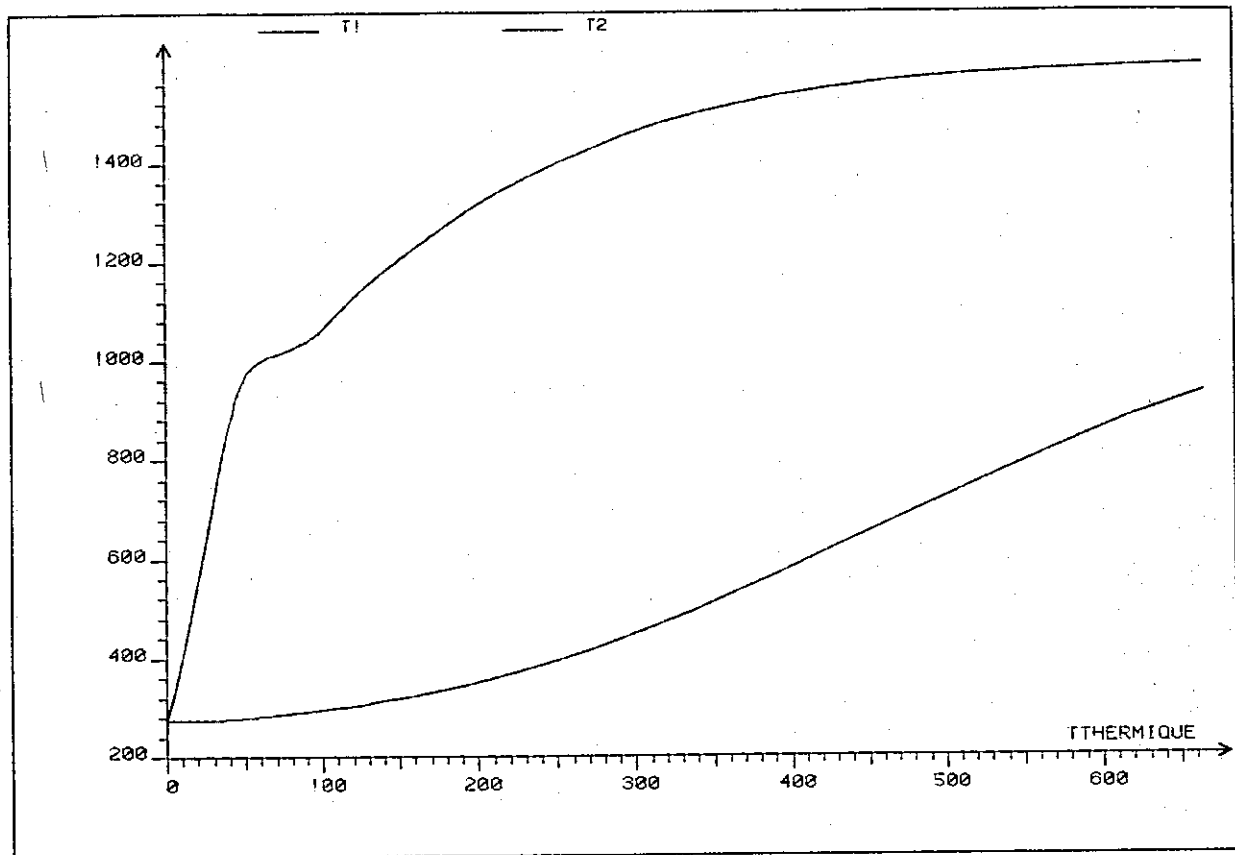


Figure III.18 Evolution de la densité de puissance active le long d'un segment de droite.



07/05/86 DIACOU - Laboratoire d'Electrotechnique - ENSIEG Grenoble

Figure III.19 Courbes d'évolution transitoire de la température.

## CONCLUSION

Le principe que nous avons adopté au cours de l'élaboration de ce système de C.A.O. et des logiciels qui le composent , était de créer une structure évolutive , facile à utiliser pour un concepteur qui n'est pas toujours familiarisé avec les techniques de programmation et de simulation numérique .

Dans chacun des deux logiciels présentés , l'utilisation de bibliothèques de dialogue et de graphique a permis de créer une interface homme-machine d'une haute convivialité .

L'intégration dans ce système , des outils et des méthodes développées au chapitre II , a pour conséquence une optimisation du temps d'exécution , une extension du domaine d'application de ces logiciels et une automatisation de la simulation qui permettent à l'utilisateur de considérer ce système comme un véritable outil d'aide à la conception au même titre que les moyens classiques actuellement mis à sa disposition .

Enfin , l'emploi de deux méthodes numériques différentes exprime la volonté que nous avons de créer la base d'un système de C.A.O. , comprenant plusieurs logiciels aux caractéristiques spécifiques , dont la réunion des domaine d'application permet de couvrir le plus grand nombre de types d'installation de chauffage par induction .



## **CHAPITRE IV . Aide au concepteur : utilisation des techniques de systèmes experts .**

**\*\*\*\*\***





## INTRODUCTION.

Jusqu'à présent , l'approche conduite lors de la modélisation des phénomènes couplés consistait à développer des modèles de simulation de plus en plus sophistiqués dont le coût d'utilisation et le temps nécessaire à l'exécution sont incompatibles avec une étude rapide . Pour remédier à cet état de fait , une modélisation plus fine doit être réalisée , le système de base (cf chapitre III ) doit être développé avec des logiciels utilisant d'autres méthodes de calcul pour couvrir un plus grand nombre de cas d'étude ( hautes fréquences, inducteurs nappes .... ) , à moindre coût .

Mais les avantages obtenus entraînent inévitablement leur lot de contraintes supplémentaires :

- un choix optimal du logiciel en fonction du problème doit être effectué . Ceci nécessite une connaissance approfondie des modèles et des méthodes numériques utilisées (cf chapitre I ).

- comme chaque logiciel est développé séparément , aucune structure commune de description n'existe et l'utilisateur doit le plus souvent redéfinir entièrement son problème lorsqu'il passe d'un logiciel à un autre pour affiner son étude .

Une réponse efficace à ces deux contraintes devrait être apportée par les techniques de système expert et de gestion de bases de données .

La structure proposée pour un tel système de C.A.O. est représentée figure IV.1 . Le système expert disposé en amont conseille l'utilisateur pour le choix du logiciel le mieux adapté à son problème tandis que la base de données commune , administrée par le système de gestion transfère automatiquement les informations d'un logiciel vers un autre si nécessaire. Le système expert , une fois le choix du logiciel réalisé , aide l'utilisateur à décrire son problème conformément aux contraintes de chaque logiciel .

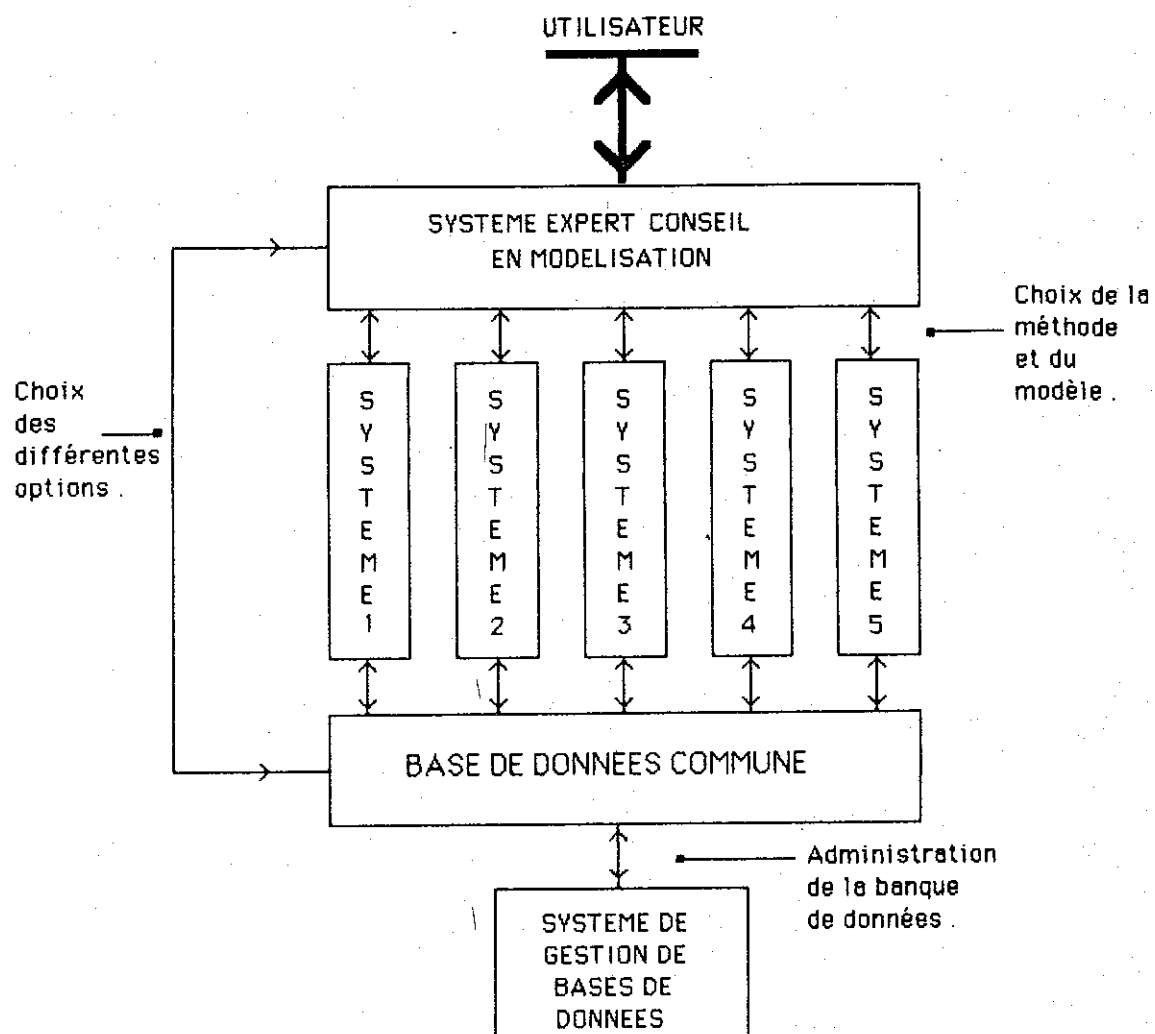


Figure IV.1 Organisation du système de C.A.O.

#### IV.1 APPORT DES TECHNIQUES DE SYSTEMES EXPERTS DANS LES SYSTEMES DE C.A.O.

Depuis quelques années les chercheurs tentent d'inclure dans les logiciels la connaissance approfondie du domaine concerné, le savoir que l'expert a accumulé, expérience après expérience, au cours des années. Le but d'un système expert est de modéliser le raisonnement de cet expert lors de ses choix et décisions pour rendre sa connaissance accessible à tous les concepteurs. Pour ce faire, le cognitifien en collaboration avec l'expert, tente de traduire le raisonnement de celui-ci sous forme de règles utilisant des faits.

exemple : si propriétés magnétiques linéaires et si sources sinusoïdales alors utilisation d'une formulation complexe.

Lors de l'utilisation du système expert, le concepteur définit son problème en fixant la validité de différents faits lorsqu'il en a la connaissance. A partir de cela, le démonstrateur de théorème du système utilise la base de règles pour définir la validité d'autres faits et tenter de déboucher sur une solution. Lorsque la base de faits est insuffisante (cas d'une impasse), le système édite les faits dont la connaissance est susceptible de le faire évoluer, charge à l'utilisateur de définir la validité de certains de ceux-ci et de relancer le démonstrateur.

Cette technique, bien que nouvelle, est actuellement en plein essor et les systèmes experts commencent à apparaître dans de nombreux domaines[48], notamment dans le calcul des échanges thermiques [46]. Dans notre cas, un système expert conseil en choix des modèles et des méthodes numériques ainsi que des options à prendre lors de l'utilisation des logiciels associés (densité de maillage, valeur de certains paramètres), permettra de simplifier l'utilisation du système de C.A.O. et dans certains cas d'optimiser le temps de calcul.

## IV.2 ETUDE DE FAISABILITE D'UN SYSTEME EXPERT CONSEIL EN MODELISATION.

L'aide que peut apporter aux concepteurs, un système expert conseil en modélisation numérique, nous paraît très appréciable, c'est pourquoi nous avons mené une étude plus approfondie pour jeter les bases d'un tel système.

Pour ce faire, nous avons procédé en plusieurs étapes :

- \* spécification du but et des réponses que doit apporter le système,
- \* étude du raisonnement du spécialiste au cours d'une expertise,
- \* étude de la représentation des connaissances.
- \* étude des différentes stratégies selon le type de problème posé ,
- \* spécification de l'interface homme machine .

### 1. Contexte et buts du système expert .

Nous nous sommes placés dans le cadre suivant : un certain nombre de logiciels de modélisation numérique sont disponibles, chacun peut utiliser une ou plusieurs méthodes de résolution et un ou plusieurs modèles de simulation numérique . Ces logiciels sont répertoriés dans un catalogue, classés par domaine d'application .

Le système expert doit offrir aux utilisateurs les services suivants :

- \* Aide à la description du problème .
- \* Choix de la méthode et du modèle numérique les mieux adaptés à ce problème puis choix du logiciel correspondant ou décision de la capacité d'un logiciel à traiter ce problème .
- \* Une fois le logiciel choisi, aide à la définition des données, ceci pouvant aller jusqu'au calcul de la valeur de certains paramètres, directement par le système expert .

Dans un premier temps, nous avons choisi de nous limiter aux deux premiers points . Les questions que le concepteur doit pouvoir poser au système expert sont

- pour un problème, quel modèle ?
- pour un problème, quelle méthode ?
- pour un problème, quel logiciels ? Quel est le meilleur ?
- pour un problème, des logiciels , quel est le meilleur ?

## 2. La prise d'expertise .

Pour élaborer un système expert, la première étape consiste à rencontrer des experts pour identifier, sur des exemples, leur stratégies de recherche et les connaissances utilisées . C'est ce que nous avons fait en rencontrant les spécialistes en modélisation de notre laboratoire . De ces discussions, nous avons pu extraire un certain nombre d'informations sur la façon de procéder d'un expert en modélisation et sur les connaissances mises en jeu .

### a) Quelques renseignements sur la stratégie de recherche de l'expert .

L'expert procède en deux temps:

- il détermine les modèles et les méthodes possibles,
- il en déduit les logiciels utilisables puis le meilleur d'entre eux .

En ce qui concerne la première étape , le raisonnement se fait en suivant deux arbres de décision, un pour les modèles et un pour les méthodes . Si les structures de ceux-ci sont indépendantes (figure IV.2) , des liens peuvent exister dans l'expression des règles qui permettent de passer d'un niveau hiérarchique au suivant . Au cours de son expertise, le spécialiste tente de parcourir le plus loin possible l'arbre sur lequel il se trouve (il commence par l'arbre modèle ) et change d'arbre s'il ne peut plus évoluer . Cette stratégie permet d'obtenir toutes les solutions possibles pour le problème posé, chaque solution étant une combinaison de feuilles de branches différentes .

Pour déterminer quel sont les logiciels utilisables, l'expert compare les solutions obtenues aux caractéristiques des logiciels contenus dans le catalogue . Il utilise alors des règles de préférence pour restreindre la base de solutions du problème de manière à n'obtenir qu'un seul logiciel utilisable : le meilleur .

### b) Les connaissances de base .

A partir de cette étude, nous avons pu regrouper les diverses connaissances de l'expert de la façon suivante :

- connaissance des différents modèles et de leurs propriétés,
- connaissance des différentes méthodes et de leurs propriétés,
- connaissance des différents logiciels et de leurs domaines d'application,
- des règles (cf chapitre I) .

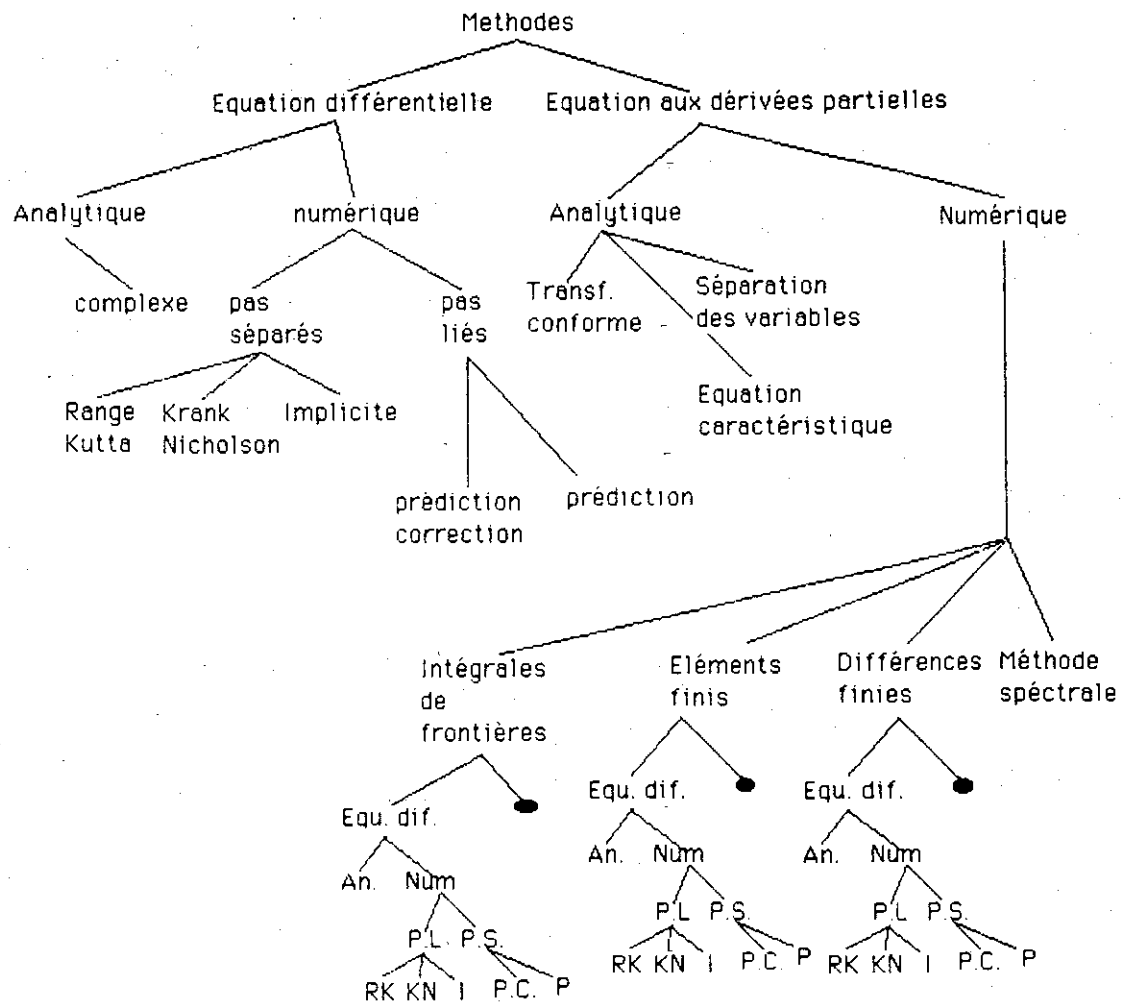


Figure IV.2 .a Arbre de décision des méthodes .

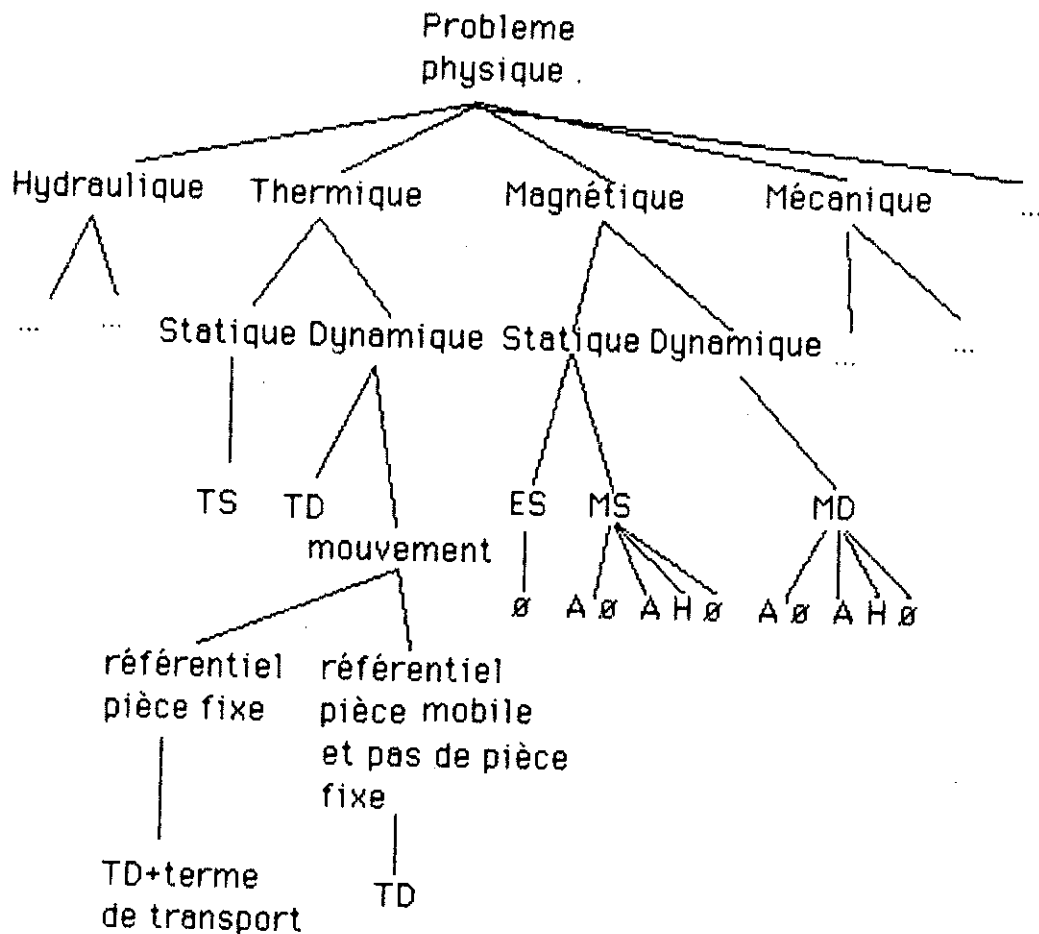


Figure IV.2.b Arbre de décision des modèles.

### 3. Représentation de la connaissance

La connaissance de l'expert s'exprime donc par des faits que représentent les noeuds des arbres, par les règles de gestion de ces faits mais aussi par la structure hiérarchisée.

#### a) Les différentes possibilités de représentation de la connaissance.

##### a.1 Représentation en logique d'ordre 0 ou 1.

Elle consiste à décrire l'ensemble de la connaissance sous la forme d'une base de faits contenant tous les faits et d'une base de règles contenant toutes les règles. La logique est d'ordre 1 si les règles font intervenir des variables, elle est d'ordre 0 dans un cas contraire.



Cette "mise à plat" de la connaissance nécessite la reconstitution des graphes à chaque passage du moteur d'inférence, ce qui conduit à des temps d'unification très importants, donc à un coût d'utilisation inacceptable. Ce manque de structure est également préjudiciable à une bonne communication entre le système et l'expert, puisque ce dernier se trouve souvent "perdu" lors de la description de son raisonnement, s'il ne possède pas les repères que constituent les niveaux hiérarchiques.

## a.2 Représentation orientée objet.

Un objet structuré peut être considéré comme un prototype, c'est à dire comme la base de comparaison à d'autres objets à analyser. Il contient un certain nombre d'attributs qui sont les noms des propriétés caractérisant l'objet, ces attributs contenant eux-mêmes des facettes qui sont répertoriées [49].

L'une des propriétés fondamentales des langages orientés objets est de permettre la description d'objets hiérarchisés avec transmission des propriétés en provenance des parents, si on ne trouve pas la caractéristique recherchée au niveau même de l'objet. Dans le cas d'un objet héritant de plusieurs parents, des propriétés contradictoires, une règle de prédominance est utilisée pour résoudre le conflit [51].

Une autre propriété fondamentale réside en la possibilité d'attacher à un objet un paquet de règles ou une fonction à activer. Cet attachement peut prendre plusieurs formes :

- avant ajout : les règles ou les fonctions sont attachées lorsqu'il y a tentative de création de l'objet.
- après ajout : les règles ou les fonctions sont attachées lorsqu'il y a eut création de l'objet.
- avant retrait : les règles ou les fonctions sont attachées lorsqu'il y a tentative de retrait de l'objet.
- après retrait : les règles ou les fonctions sont attachées lorsqu'il y a eut retrait de l'objet.
- avant modification
- après modification
- ...

L'utilisation d'un langage orienté objet permet d'ajouter et de retirer des règles au cours du raisonnement de manière à restreindre le plus possible la base de connaissance utilisée par le moteur d'inférence.

### a.3 Représentation de l'incertain dans un langage orienté objet .

La plupart des représentations en objets permettent de spécifier des valeurs d'attributs par défaut, qui seront utilisées en l'absence d'informations . Ces valeurs pourront être remplacées ultérieurement par les valeurs effectives si elles viennent à être connues .

D'autre part, la comparaison entre un objet et le prototype fait généralement apparaître des différences bien qu'il y ait en commun un certain nombre de propriétés fondamentales . Ces différences peuvent être le reflet d'exceptions par rapport au prototype ou simplement la spécification de détails non prévus dans la description du prototype .

### b) La représentation choisie .

Pour conserver la hiérarchie contenue dans les arbres de décision des modèles et des méthodes, la connaissance dans ces deux domaines est représentée par deux hiérarchies d'objets et deux bases de règles attachées aux objets . Une base de règles en logique d'ordre 0 représente la connaissance des logiciels et une base de règles de préférence, également en logique d'ordre 0, permet de supprimer certains faits pour obtenir l'unicité du logiciel proposé .

## 4. La stratégie de parcours .

### a) Les possibilités .

Pour faire évoluer la base de faits et obtenir une solution à notre problème, il faut choisir la stratégie de parcours de la connaissance (faits,règles) . Deux possibilités s'offrent à nous :

- Le guidage par les règles . Il consiste à passer en revue toutes les règles et à utiliser celles dont les prémisses sont vérifiées . Il est utilisable en chainage avant (guidage par la connaissance ) ou arrière (guidage par le but ) . Il est le plus souvent employé dans les systèmes à représentation de connaissance classique en logique d'ordre 0 ou 1 .

Ce type de guidage conduit à la perte de la notion de hiérarchie et pose le problème de l'état de retour quand le résultat obtenu est une impasse (pas de solution ) .

- Le guidage par les objets . Il consiste à parcourir les graphes pour créer des objets . Ce parcours peut se faire :

\* en chaînage avant ; soit en profondeur si la stratégie consiste à créer des objets le plus loin possible vers les feuilles de l'arbre, dans une direction donnée, soit en largeur si la stratégie consiste à créer les objets par niveau hiérarchique . Une combinaison des deux peut être utilisée .

\* en chaînage arrière .

#### b) La stratégie choisie .

Pour conserver la hiérarchie contenue dans la représentation de la connaissance des modèles et des méthodes, nous avons choisi une stratégie de parcours guidée par les objets qui dépend cependant du problème traité .

Cas des questions : un problème , quels modèles ?

: un problème , quelles méthodes ?

: un problème , quels logiciels ?

Nous avons choisi un chaînage avant par niveau sur les prototypes modèles et méthodes, puis un chaînage arrière sur les logiciels pour le troisième problème .

Si l'unification n'est pas totale et si les questions nécessaires demeurent sans réponse, les unifications partielles sont indiquées à l'utilisateur .

La recherche du meilleur logiciel s'effectue en lançant les règles de préférence en chaînage avant (guidage par les règles) , ce qui a pour effet de restreindre la base de faits . Le chaînage arrière logiciel est lancé sur la nouvelle base de faits, avec les solutions suivantes :

un seul logiciel	=>	c'est le meilleur ,
pas ou plusieurs logiciels	=>	impossibilité de faire un choix compte tenu de la connaissance contenue dans la base des règles de préférence .

Cas de la question : un problème , des logiciels , le meilleur ?

A chaque logiciel correspondent certaines propriétés (noeuds des graphes modèles et méthodes ) . Pour déterminer si un logiciel est utilisable, il convient de s'assurer que toutes ses propriétés sont vérifiées. Cela revient à utiliser un chaînage arrière dans les deux graphes

à partir des noeuds correspondants aux propriétés à vérifier. Si toutes les propriétés ne le sont pas, certaines restrictions sur le problème sont à envisager et l'utilisateur en est informé.

Une fois que la liste des logiciels utilisables, parmi l'ensemble initial, est obtenu, le choix du meilleur est effectué comme précédemment.

### 5. Le moteur d'inférence.

Pour choisir notre moteur d'inférence en langage orienté objet (LOOBS), nous avons deux possibilités.

- \* Soit utiliser un moteur existant. Il en existe certains prototypes dont nous donnons quelques exemples.

Shirka, Criquet, MI4, SIPRUC...

- \* Soit réaliser un moteur particulier, en utilisant les langages adaptés.  
LISP ou PROLOG

Nous avons choisi la deuxième solution car, actuellement, les LOOBS constituent un sujet important de recherche en intelligence artificielle et les versions industrielles sont soit inexistantes, soit inadaptées à notre système (type d'attachement, chainage avant et arrière, plusieurs graphes). Pour réaliser notre moteur, Prolog a été retenu car ce langage permet une programmation aisée, une stratégie en chainage arrière automatique et accepte les extensions programmées (attachement d'une fonction...).

### 6. Spécification de l'interface entre l'utilisateur et le système.

Nous devons tout d'abord distinguer deux types d'utilisateurs de ce système.

Le gestionnaire. En collaboration avec l'expert, il doit pouvoir faire évoluer aussi bien les logiciels contenus dans le catalogue (mise à jour des propriétés, ajout d'un nouveau logiciel ou suppression d'un logiciel obsolète) que la base de connaissance du système (ajout de nouvelles règles, modification des arbres de décision, etc...).

L'utilisateur. L'interface du système doit lui permettre de poser une question, que ce soit pour résoudre un problème ou pour obtenir des informations sur le mode d'utilisation de tel ou tel logiciel du catalogue.

L'interface doit également être capable de poser des questions pour guider l'utilisateur dans la définition de son problème, de contrôler la cohérence de ces informations et d'expliquer sa démarche lors de la résolution d'un problème.

D'un point de vue pratique, l'utilisation d'une bibliothèque de dialogue, de mots clés et de menus adaptés à l'état de la connaissance doit permettre d'obtenir un interface de bonne convivialité. Une mémorisation des réponses de l'utilisateur doit être effectuée pour supprimer toute question inutile.

Enfin, un interface en langage naturel doit être utilisé pour permettre une analyse du texte qui définit le problème, de façon à le traduire en faits directement utilisables par le moteur d'inférence.

## CONCLUSION

Actuellement, le potentiel des techniques des systèmes experts s'accroît d'une façon considérable, ayant pour conséquence des machines de plus en plus performantes (5ème génération ) et des logiciels et des moteurs plus conviviaux .

L'aide à l'utilisateur d'outils de C.A.O. devient nécessaire (spécificité et sophistication de plus en plus grandes ) . Elle deviendra obligatoire d'ici peu .

Nous avons montré par cette étude de faisabilité que les Systèmes experts sont à même de résoudre ce type de problème . La construction d'un tel système reste à faire et constitue un sujet de recherche appliquée dans un des domaines les plus dynamiques à l'heure actuelle .



## CONCLUSION





## CONCLUSION

A partir d'une étude globale de la modélisation des phénomènes magnéto-thermiques couplés et à travers l'approche des différents auteurs et l'examen des logiciels existants, nous avons tenté de définir les principaux axes de recherche permettant d'élaborer des méthodes et des outils pour la simulation de phénomènes couplés en général, et la simulation du couplage magnéto-thermique en particulier.

Tout au long de cette étude, trois concepts ont guidé notre travail :

- \* l'optimisation des temps de calcul et d'attente du concepteur devant sa console ,
- \* la modélisation des phénomènes qui interviennent dans le couplage magnéto-thermique et que les logiciels existants ne prenaient pas en compte ,
- \* l'aide au concepteur dans la conduite de la simulation ,

Pour répondre à la première de ces préoccupations, la mise en oeuvre de la méthode de prédiction correction pour la simulation numérique d'un seul phénomène ou de plusieurs (prédiction correction croisée ), nous a semblé une solution intéressante puisque le gain obtenu en nombre de résolutions aussi bien qu'en facilité d'exécution (autoadaptation de la valeur des pas de temps ) est appréciable pour l'utilisateur .

La mise au point d'un automate de résolution défini par son Grafcet, utilisant les techniques habituelles de représentation des automatismes séquentiels, permet d'automatiser la séquence de simulation pour décharger l'utilisateur des contraintes dues au couplage de phénomènes physiques différents . La possibilité intrinsèque de résolution parallèle, utilisée sur les réseaux de calculateurs, optimise sensiblement le temps d'attente du concepteur devant sa console .

La mise au point d'une description formelle des propriétés physiques et l'élaboration d'un macro-élément pour les échanges radiatifs multireflexion étendent le domaine d'application de la simulation numérique à des installations magnétothermiques qui, jusqu'alors, échappaient aux domaines d'investigation des logiciels existants .

Enfin, l'utilisation d'une structure bibliothèque pour les logiciels de modélisation permet de constituer un noyau général, configurable selon le type de problème couplé à résoudre.

L'élaboration d'un système de C.A.O. pour installations de chauffage par induction a été présentée au chapitre III. Au cours de ce travail, nous avons souhaité créer une structure évolutive, facile à utiliser pour un concepteur qui n'est pas toujours familiarisé avec les techniques de programmation et de simulation numérique. L'utilisation de bibliothèques de dialogue et de graphique a permis de créer un interface homme-machine d'une haute convivialité qui, joint à l'intégration des méthodes et outils précédents, permet de considérer ce système comme un véritable outil d'aide à la conception, au même titre que les moyens classiques actuellement mis à la disposition des ingénieurs des bureaux d'étude.

Lors de ce travail, nous avons voulu créer la base d'un système de C.A.O. qui comprendra des logiciels aux caractéristiques spécifiques, dont la réunion des domaines d'application permettra de couvrir avec une efficacité accrue et à moindre coût, le plus grand nombre de types d'installations de chauffage par induction.

Mais l'étude des modèles et des méthodes numériques nous a montré combien il pouvait être difficile, pour un non spécialiste, de choisir ceux qui correspondent le mieux à son problème. Or, s'il dispose d'une panoplie de logiciels, le concepteur devra souvent effectuer ce choix sans vraiment en mesurer les conséquences. C'est pourquoi nous nous sommes intéressés aux techniques de systèmes experts pour déterminer s'ils pouvaient être une solution à ce problème. La spécification d'un système expert conseil en modélisation numérique nous a permis de répondre positivement à cette question.

Dans un avenir proche, l'intégration des installations de chauffage et de traitement thermique par induction dans les chaînes de production automatisées, sera la condition d'une expansion de l'utilisation de cette méthode de traitement thermique. Dans ce cadre, la C.A.O. basée sur des logiciels de simulation numérique des phénomènes magnétiques et thermiques, constitue la première étape du travail à effectuer.

Mais pour automatiser le système de chauffage, le couplage du logiciel de C.A.O. avec une carte de contrôle de l'installation, située sur le site de production, est indispensable. Il permettra d'utiliser les résultats de la simulation numérique comme valeurs de référence pour une régulation de la

puissance injectée dans la charge et constituera également un nouveau mode de détection des anomalies de fonctionnement par comparaison des caractéristiques électriques prédites et des valeurs mesurées.

Dans ce but, une organisation de travail, un regroupement de compétences autour de ce thème et une évaluation des actions de recherche à mener devront être entrepris pour faire évoluer les systèmes de chauffage et de traitement thermique actuels vers de véritables ateliers flexibles en induction. Ceux-ci présenteraient des avantages économiques considérables car ils permettraient une production continue et assureraient une gestion optimale de l'énergie consommée grâce à l'adaptation systématique de l'inducteur et des lois de commande à chaque type de pièce traitée.



## BIBLIOGRAPHIE



## BIBLIOGRAPHIE

### Modélisation numérique , ouvrages généraux .

- [ 1 ] MASSE  
 "Analyse méthodologique de la modélisation numérique des équations de la physique des milieux continus à l'aide de la méthode des éléments finis .  
 Flux Expert , un système d'aide à la construction de logiciels ."  
 Thèse de Doctorat ès Sciences , INPG , juin 1983
  
- [ 2 ] COULOMB , SABONNADIÈRE  
 "C.A.O. en Electrotechnique ."  
 HERMES , 85
  
- [ 3 ] PION  
 "Amélioration des performances des logiciels d'éléments finis  
 par utilisation de méthodes d'agrégation et d'architectures parallèles ."  
 Thèse Docteur-Ingénieur , INPG , 1984 .
  
- [ 4 ] ZIENKIEWICZ  
 " La méthode des éléments finis ."  
 Ediscience 1975 .
  
- [ 5 ] AZIZ  
 "Mathematical foundations of the finite element method with  
 applications to partial equations ."  
 Acad-press N.Y 1972
  
- [ 6 ] CENDES , SHENTON , SHAHNASSER  
 "Adaptative Finite Element Mesh generation using the Delaunay Algorithm ."  
 COMPUMAG , Gènes , 1983
  
- [ 7 ] BOILLON , COULOMB , ANCELLE  
 "Apport de la paramétrisation dans un logiciel de C.A.O. "  
 IASTED 83
  
- [ 8 ] ALBERTINI  
 "Optimisation du maillage bidimensionnel automatique du programme FLUX-LAB."  
 DEA INPG , 1985
  
- [ 9 ] SABONNADIÈRE  
 "Conception assistée par ordinateur des machines électriques ."  
 R.G.E. p137 à 144 , 1980

### Modélisation numérique des phénomènes magnétiques .

- [ 10 ] COULOMB  
 "Analyse tridimensionnelle des champs électriques et magnétiques par la méthodes des éléments finis ."  
 Thèse de Doctorat ès Sciences , INPG , juin 1981



[11] NICOLAS

"Application de la méthode des équations intégrales de frontières à la modélisation des phénomènes d'induction."  
Thèse ECL, 1983.

[12] DU TERRAIL

"Modélisation de champs magnétiques pour l'étude de problèmes magnétodynamique en présence de matériaux isotropes à caractéristique magnétique non linéaire."  
DEA, ENSIEG, 1982

[13] CHARI, SILVESTER

"Finite element in electrical and magnetic field problems."  
Wiley, New-York 1980

[14] BOSSAVIT

"Numerical determination of an equivalent complex permeability for saturated steel."  
COMPUMAG, 1976

[15] COULOMB, KOUYOUMDJIAN

"2D finite element analysis package for sensitivity analysis in electrotechnique."  
Ensoft'85

[16] GITOSUSASTRO

"Contribution à l'évaluation par la méthode des éléments finis, des incertitudes dues à la modélisation des caractéristiques magnétiques."  
DEA INPG, 1985.

[17] KOUYOUMDJIAN

"Contribution à l'étude et à la résolution des grands systèmes matriciels creux provenant de l'étude de problèmes d'électrotechnique par la méthode des éléments finis".  
DEA, INPG, 1982

#### Modélisation numérique des phénomènes thermodynamiques.

[18]

ROYE

"Modélisation thermique des machines tournantes  
Application à la machine à induction."  
Thèse de Doctorat ès Sciences, INPG, novembre 1983

[19]

AGUIRRE, RAMIREZ, ODEN

"Finite element technique applied to heat conduction in solid with temperature dependant thermal conductivity".  
Paper 68 WA/HT-34 in ASME Wint. Ann. Meeting, Los Angeles, pp 16-20 (Nov. 1969).

[20] SAULNIER

"La modélisation thermique et ses applications aux transferts couplés et au contrôle actif".

Thèse de Doctorat ès Sciences, ENSMA Poitiers, Octobre 1980.

[21] SACADURA

"Initiation aux transferts thermiques".

Techniques et documentation (Lavoisier), 1982

[22] Mc ADAMS

"Heat Transmission"

Mc Graw Hill Book Company, 1954

[23] SIEGEL, HOWELL

"Thermal radiation heat transfer."

Second Edition, Mc Graw Hill Book Company, 1981

#### Modélisation numérique des phénomènes couplés.

[24] MASSE, MOREL, BREVILLE

"A finite element prediction correction scheme for magneto-thermal coupled problem during Curie's transition."

IEEE transaction of magnetics, VOL. MAG-21 N°5 septembre 1985

[25] BREVILLE, MASSE, PION

"A parallel transient management of finite element solvers by a grafcet based monitor."

COMPUMAG 85

[26] BREVILLE, MASSE, BAUDON

"Un macro élément pour modéliser les échanges radiatifs multireflexion par la méthode des éléments finis en magnétothermie."

MONTECH 86

[27] WANG

"Contribution à l'étude de la méthode de prédiction correction."

D.E.A., INPG, 1985

#### Modélisation numérique du chauffage par induction.

[28] METAIL

Dimensionnement d'inducteurs : possibilités d'utilisation de méthodes de calcul simples. Note EDF, HE 122 T 290.

[29] METAIL, LEVEL

Dimensionnement d'inducteurs pour le chauffage de billettes d'acier.

Note EDF, HE 122 W 1201.

[30] HEURTIN, METAIL, POIROUX

Chauffage par induction : synthèse des résultats d'essais acquis

Note EDF, HE 122 T 351.

#### Biblio 4

[31] BERNARD

"Contribution à la modélisation des fours à induction pour le réchauffage de billette de section rectangulaire."

Thèse de Docteur - Ingénieur, ECL, juin 1979.

[32] MARCHAND

"Les effets d'extrémités en chauffage par induction."

Thèse de Docteur - Ingénieur, ECL, janvier 1984.

[33] BLEUVIN

"Analyse par la méthode des éléments finis des phénomènes magnéto-thermiques."

Application aux systèmes de chauffage par induction."

Thèse de Docteur-Ingénieur, INPG, octobre 1984.

[34] BRISSONNEAU, BRUGEL

Etude thermique des propriétés magnétiques d'un acier.

Rapport scientifique de la RCP "modélisation et calcul des systèmes magnétoélectrothermiques", CNRS, 1979.

[35] COEVET, MARION

Etude expérimentale des effets d'extrémité.

Note EDF, HE 122 NS 1984.

[36] POIROUX, NEMR

Examen des conditions de dissipation d'énergie des produits non homogènes (gradient de température). Etablissement d'un modèle numérique pour le chauffage de billettes.

Note EDF, HE 122 W 1512

[37] ROSE

Un programme d'éléments finis bidimensionnel pour la simulation du chauffage par induction.

Note EDF, HI/4649-07

[38] BREVILLE, BAUDON

"CHLOE: A C.A.D. software for induction heating systems."

IMACS 85

[39] BREVILLE, MEUNIER, COULOMB, MASSE

"A C.A.D. package for magneto-heating systems with multireflective radiative boundary conditions."

INTERMAG 86

[40] ERNST

"Répartition de courant dans un inducteur à symétrie de révolution destiné au chauffage par induction."

RGE mars 1984.

[41] BRASSARD

"Contribution à l'étude de dispositifs de chauffage par induction."

DEA, INPG, 1984.

Techniques de systèmes experts.

[42] MASSE

Cours Systèmes Experts ENSIEG 1986

[43] GONDRAND

Initiation aux systèmes experts .  
Editions Eyrolles .

[44] SAUREL

"Système expert d'assistance aux réalisateurs de logiciels scientifiques ."  
5èmes Journées internationales sur les Systèmes experts et leurs applications ,  
Avignon 1985 .

[45] MASSE

"Représentation des connaissances et utilisation des techniques de systèmes experts dans un logiciel de C.A.O. type éléments finis : FLUX-EXPERT ."  
4èmes Journées internationales sur les Systèmes experts et leurs applications ,  
Avignon 1984 .

[46] VERGARA

"EXTHER : un prototype de système expert en échanges thermiques ."  
6èmes Journées internationales sur les Systèmes experts et leurs applications ,  
Avignon 1986 .

[47] TAILLIBERT

"M14 ou comment développer des systèmes experts avec Prolog ."  
6èmes Journées internationales sur les Systèmes experts et leurs applications ,  
Avignon 1986 .

[48] AGENCE DE L'INFORMATIQUE

"Catalogue des prototypes de recherche ."  
6èmes Journées internationales sur les Systèmes experts et leurs applications ,  
Avignon 1986 .

[49] BONNET

"L'utilisation des langages orientés objets en intelligence artificielle ."  
4èmes Journées internationales sur les Systèmes experts et leurs applications ,  
Avignon 1984 .

[50] LAURENT

"Les moteurs de systèmes experts : Typologie, comparaison  
et guide du concepteur ."  
4èmes Journées internationales sur les Systèmes experts et leurs applications ,  
Avignon 1984 .

[51] RECHENMAN, BENSaid, GRANIER

"SHIRKA: des systèmes experts centrés objet ."  
4èmes Journées internationales sur les Systèmes experts et leurs applications ,  
Avignon 1984 .



**A U T O R I S A T I O N de S O U T E N A N C E**

VU les dispositions de l'article 15 Titre III de l'arrêté du 5 juillet 1984 relatif aux études doctorales

VU les rapports de présentation de Messieurs

. A. F O G G I A, Professeur

. J.C U R I N G

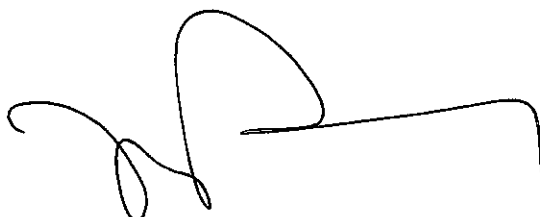
**Monsieur Thierry BREVILLE**

est autorisé à présenter une thèse en soutenance en vue de l'obtention du diplôme de  
DOCTEUR de L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, spécialité  
"Génie électrique".

Fait à Grenoble, le 5 juin 1986

**D. BLOCH**  
Président  
de l'Institut National Polytechnique  
de Grenoble

**P.O. le Vice-Président,**





# INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

**Président :** Daniel BLOCH

Année universitaire 1985-1986

**Vice-Présidents:** B. BAUDELET  
R. CARRE  
H. CHERADAME  
J.M. PIERRARD

## Professeurs des Universités

BARIBAUD	Michel	ENSERG	JOUBERT	Jean-Claude	ENSIEG
BARRAUD	Alain	ENSIEG	JOURDAIN	Geneviève	ENSIEG
BAUDELET	Bernard	ENSIEG	LACOUME	Jean-Louis	ENSIEG
BEAUFILS	Jean-Claude	ENSEEG	LESIEUR	Marcel	ENSHG
BESSON	Jean	ENSEEG	LESPINARD	Georges	ENSHG
BLIMAN	Samuel	ENSERG	LONGEQUEUE	Jean-Pierre	ENSIEG
BLOCH	Daniel	ENSIEG	LOUCHET	François	ENSEEG
BOIS	Philippe	ENSHG	MASSELOT	Christian	ENSIEG
BONNETAIN	Lucien	ENSEEG	MAZARE	Guy	ENSIMAG
BONNIER	Etienne	ENSEEG	MOREAU	René	ENSHG
BOUVARD	Maurice	ENSHG	MORET	Roger	ENSIEG
BRISSONNEAU	Pierre	ENSIEG	MOSSIERE	Jacques	ENSIMAG
BRUNET	Yves	ENSIEG	OBLED	Charles	ENSHG
BUYLE-BODIN	Maurice	ENSERG	PARIAUD	Jean-Charles	ENSEEG
CAILLERIE	Denis	ENSHG	PAUTHENET	René	ENSIEG
CAVAIGNAC	Jean-François	ENSIEG	PERRET	René	ENSIEG
CHARTIER	Germain	ENSIEG	PERRET	Robert	ENSIEG
CHENEVIER	Pierre	ENSERG	PIAU	Jean-Michel	ENSHG
CHERADAME	Hervé	UERMCP	POLOUJADOFF	Michel	ENSIEG
CHERUY	Arlette	ENSIEG	POUPOT	Christian	ENSERG
CHIAVERINA	Jean	UERMCP	RAMEAU	Jean-Jacques	ENSEEG
COHEN	Joseph	ENSERG	RENAUD	Maurice	UERMCP
COUMES	André	ENSERG	ROBERT	André	UERMCP
DURAND	Francis	ENSEEG	ROBERT	François	ENSIMAG
DURAND	Jean-Louis	ENSIEG	SABONNADIERE	Jean-Claude	ENSIEG
FONLUPT	Jean	ENSIMAG	SAUCIER	Gabrielle	ENSIMAG
FOULARD	Claude	ENSIEG	SCHLENKER	Claire	ENSIEG
GANDINI	Alessandro	UERMCP	SCHLENKER	Michel	ENSIEG
GAUBERT	Claude	ENSIEG	SERMET	Pierre	ENSERG
GENTIL	Pierre	ENSERG	SILVY	Jacques	UERMCP
GUERIN	Bernard	ENSERG	SOHM	Jean-Claude	ENSEEG
GUYOT	Pierre	ENSEEG	SOUQUET	Jean-Louis	ENSEEG
IVANES	Marcel	ENSIEG	TROMPETTE	Philippe	ENSHG
JAUSSAUD	Pierre	ENSIEG	VEILLON	Gérard	ENSIMAG

## Professeurs Université des Sciences Sociales (Grenoble II)

BOLLIET	Louis	CHATELIN	Françoise
---------	-------	----------	-----------

## Chercheurs du C.N.R.S

CARRE	René	Directeur de recherche	DAVID	René	Maître de recherche
CAILLET	Marcel	"	DEPORTES	Jacques	"
FRUCHART	Robert	"	DRIOLE	Jean	"
JORRAND	Philippe	"	EUSTATHOPOULOS	Nicolas	"
LANDAU	Ioan	"	GIVORD	Dominique	"
ALLIBERT	Colette	Maître de recherche	JOUD	Jean-Charles	"
ALLIBERT	Michel	"	KAMARINOS	Georges	"
ANSARA	Ibrahim	"	KLEITZ	Michel	"
ARMAND	Michel	"	LEJEUNE	Gérard	"
BINDER	Gilbert	"	MERMET	Jean	"
BONNET	Roland	"	MUNIER	Jacques	"
BORNARD	Guy	"	SENATEUR	Jean-Pierre	"
CALMET	Jacques	"	SUERY	Michel	"
			WACK	Bernard	"



**Personnalités agréées à titre permanent à diriger  
des travaux de recherche (Décision du conseil scientifique)**

**E.N.S.E.E.G**

BERNARD  
CAILLET  
CHATILLON  
CHATILLON  
COULON  
DIARD

Claude  
Marcel  
Catherine  
Christian  
Michel  
Jean-Paul

FOSTER  
GALERIE  
HAMMOU  
MALMEJAC  
MARTIN GARIN  
NGUYEN TRUONG

Panayotis  
Alain  
Abdelkader  
Yves  
Régina  
Bernadette

RAVAINE  
SAINFORT  
SARRAZIN  
SIMON  
TOUZAIN  
URBAIN

Denis  
Paul  
Pierre  
Jean-Paul  
Philippe  
Georges

**E.N.S.E.R.G**

BOREL  
CHOVET

Joseph  
Alain

DOLMAZON  
HERAULT

Jean-Marc  
Jeanny

**E.N.S.I.E.G**

BORNARD  
DESCHIZEAUX  
GLANGEAUD

Guy  
Pierre  
François

KOFMAN  
LEJEUNE

Walter  
Gérard

MAZUER  
PERARD  
REINISCH

Jean  
Jacques  
Raymond

**E.N.S.H.G**

ALEMANY  
BOIS

Antoine  
Daniel

DARVE  
MICHEL

Félix  
Jean-Marie

ROWE  
VAUCLIN

Alain  
Michel

**E.N.S.I.M.A.G**

BERT  
CALMET

Didier  
Jacques

COURTIN  
COURTOIS  
DELLA DORA

Jacques  
Bernard  
Jean

FONLUPT  
SIFAKIS

Jean  
Joseph

**U.E.R.M.C.P.P**

CHARUEL

Robert

**C.E.N.G**

CADET  
COEURE  
DELHAYE  
DUPUY

Jean  
Philippe  
Jean-Marc  
Michel

JOUBE  
NICOLAU  
NIFENECKER

Hubert  
Yvan  
Hervé

PERROUD  
PEUZIN  
TAIEB  
VINCENDON

Paul  
Jean-Claude  
Maurice  
Marc

**Laboratoires extérieurs :**

**C.N.E.T**

DEMOULIN  
DEVINE

Eric

GERBER

Roland

MERCKEL  
PAULEAU

Gérard  
Yves

\*\*\*\*\*

# ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE SAINT-ETIENNE

Directeur : Monsieur M. MERMET  
 Directeur des Etudes et de la formation : Monsieur J. LEVASSEUR  
 Directeur des recherches : Monsieur J. LEVY  
 Secrétaire Général : Mademoiselle M. CLERGUE

## Professeurs de 1ère Catégorie

COINDE	Alexandre	Gestion
GOUX	Claude	Métallurgie
LEVY	Jacques	Métallurgie
LOWYS	Jean-Pierre	Physique
MATHON	Albert	Gestion
RIEU	Jean	Mécanique - Résistance des matériaux
SOUSTELLE	Michel	Chimie
FORMERY	Philippe	Mathématiques Appliquées

## Professeurs de 2ème catégorie

HABIB	Michel	Informatique
PERRIN	Michel	Géologie
VERCHERY	Georges	Matériaux
TOUCHARD	Bernard	Physique Industrielle

## Directeur de recherche

LESBATS	Pierre	Métallurgie
---------	--------	-------------

## Maîtres de recherche

BISCONDI	Michel	Métallurgie
DAVOINE	Philippe	Géologie
FOURDEUX	Angeline	Métallurgie
KOBYLANSKI	André	Métallurgie
LALAUZE	René	Chimie
LANCELOT	Francis	Chimie
LE COZE	Jean	Métallurgie
THEVENOT	François	Chimie
TRAN MINH	Canh	Chimie

## Personnalités habilitées à diriger des travaux de recherche

DRIVER	Julian	Métallurgie
GUILHOT	Bernard	Chimie
THOMAS	Gérard	Chimie

## Professeur à l'UER de Sciences de Saint-Etienne

VERGNAUD	Jean-Maurice	Chimie des Matériaux & chimie industrielle
----------	--------------	--

\*\*\*\*\*